
Untersuchungen zum erforderlichen Sicherheitsniveau von Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen

von der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
der Technischen Universität Dresden
genehmigte Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Ralph Fischer
geboren in Berlin

eingereicht am 22.07.2014
verteidigt am 17.12.2015

Betreuender Hochschullehrer

Prof. Dr.-Ing. Jochen Trinckauf (TU-Dresden, Erstgutachter)

Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. Udo J. Becker (TU-Dresden, Vorsitzender)
Prof. Dr.-Ing. Jochen Trinckauf (TU-Dresden, Erstgutachter)
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer (DLR Braunschweig und Berlin, Zweitgutachter)
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling (TU-Dresden)
Prof. Dr.-Ing. Günter Löffler (TU-Dresden)

Danksagung

Diese Arbeit wurde möglich durch die freundliche Betreuung der Professur für Verkehrssicherungstechnik unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Trinckauf an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden. Ihm gilt mein herzlicher Dank für die fachliche Betreuung und für die Möglichkeit der nebenberuflichen Promotion.

Gleichfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer für die Übernahme der Zweitbegutachtung der Arbeit und für viele wertvolle Hinweise.

Vielfache Anregungen gaben ebenfalls die Herren Dr.-Ing. Erich Eisenbrand, Dr.-Ing. Ulrich Maschek, Dr.-Ing. Enrico Anders und Dr.-Ing. Qamar Mahboob sowie die weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Professur für Verkehrssicherungstechnik. Die konstruktiven, kritischen Diskussionen wurden zum Indikator für die Erarbeitung der Inhalte dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei der Firma Isograph Inc für die Bereitstellung der Software „FaultTree+“, mit deren Hilfe die Ergebnisse dieser Arbeit verifiziert werden konnten.

Von entscheidender Bedeutung für den Werdegang dieser Arbeit war ebenfalls die familiäre Unterstützung, für die ich mich ebenfalls herzlich bedanken möchte.

München 2015

Ralph Fischer

Thesen zur wissenschaftlichen Arbeit

1. Wissenschaftliche Untersuchungen zur Sinnhaftigkeit heutiger betrieblicher und planerischer Regelungen für Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen sind erforderlich.
2. Die derzeit gültigen Planungsregeln für Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen können deutlich flexibler und mit weniger Restriktionen gestaltet werden.
3. Nach den derzeit gültigen Regelungen ist in einer großen Anzahl von Fällen das Stellen von Zügen nach einer Detektion durch eine Heißläufer- bzw. Festbremsortungsanlage an einem Hauptsignal vorgeschrieben. Es gibt wirtschaftlich günstigere Möglichkeiten, d. h. ohne teure Sicherungstechnik.
4. Das Stellen von Zügen nach der Detektion durch eine Heißläufer- bzw. Festbremsortungsanlage an einer Hektometertafel statt an einem Hauptsignal ist sicherheitlich vertretbar. Jedoch müssen der Triebfahrzeugführer und der Fahrdienstleiter direkt von der Heißläufer- bzw. Festbremsortungsanlage über die Detektion auf getrennten Kommunikationswegen informiert werden.
5. Der heute vorgeschriebene Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen von maximal 70 km ist wissenschaftlich nicht haltbar. Der maximale Abstand zwischen zwei derartigen Anlagen sollte nicht mehr als 59 km betragen. Anzustreben ist ein Abstand von 50 km.
6. Die derzeit vorgeschriebenen Ersatzmaßnahmen beim Ausfall einer Heißläufer- und Festbremsortungsanlage sind nicht ausreichend. Dies gilt insbesondere für Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h, bei denen derzeit bis 72 Stunden nach dem Ausfall häufig keinerlei Ersatzmaßnahmen vorgesehen sind. Ersatzmaßnahmen müssen stattdessen unverzüglich ergriffen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Heutige Technologie und Technik von Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen.....	4
2.1	Funktion von Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen	5
2.2	Betriebliche Abläufe ab Erreichen der Regelalarmschwellen	8
2.3	Fahrzeugseitige Überwachung von Radsatzlagerschäden und Festen Bremsen.....	11
2.4	Ausgewählte Planungsgrundsätze für Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen.....	12
2.5	Ersatzmaßnahmen beim Ausfall von Heißläufer- oder Festbremsortungsanlagen.....	16
3	Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“	18
3.1	Stellung von Zügen mit detektiertem Heißläufer und Aussetzen des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik	23
3.2	Stellung von PZB-überwachten, HOA-detektierten Zügen und Aussetzung des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik.....	24
3.2.1	Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“.....	25
3.2.2	Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung	36
3.2.3	Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite.“	38
3.2.4	Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“	50
3.2.5	Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“	54

3.2.6	Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“	55
3.2.7	Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs nach heutigen anerkannten Regeln der Technik	56
3.2.8	Vertiefende Ereigniskettenbetrachtung mithilfe von Fehlerbäumen	59
3.3	Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik	70
4	Entwicklung neuer Systemdesigns zur Stellung HOA-detektierter Züge	83
4.1	Ereignisketten des Stellens von Zügen mit Heißläufer an der 3H-Tafel einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs	84
4.1.1	Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ bei der Stellung an der 3H-Tafel	86
4.1.2	Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel.“	86
4.1.3	Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“	91
4.1.4	Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs	93
4.2	Stellen von HOA-detektierten Zügen an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer	101
4.2.1	Das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen an das System MAS 90“	104
4.2.2	Das Ereignis: „Die HOA-Alarmmeldung wird von der MAS 90 mit der Zugnummer an die Kommunikationseinheit übertragen.“	104
4.2.3	Das Ereignis: „Die Kommunikationseinheit kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die Alarmart, die detektierte Achse, die	

	Kilometrierung der 3H-Tafel und bei einem Alarm ‚Differenz Heiß‘ bzw. Heißalarm die detektierte Zugseite.“	105
4.2.4	Das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter erhält die HOA-Alarmmeldung und nimmt diese wahr.“	107
4.2.5	Das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“	108
4.2.6	Das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse mit mehrfacher Abhörmöglichkeit der HOA-Alarmmeldung durch die Kommunikationseinheit.“	125
4.2.7	Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ bei der Stellung des HOA-detektierten Zuges an der 3H-Tafel	126
4.2.8	Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer.....	127
5	Abschätzung des notwendigen Abstands von HOA als Ersatz für entfallene Bahnpersonale.....	136
5.1	Abschätzung der Häufigkeit der Lager-Heißläuferdetektion durch Betriebsbeamte im Jahr 1983.....	139
5.1.1	Detektion von Lager-Heißläufern durch Betriebsbeamte im Bahnhof vor Einführung der HOA nach dem realistischen Ansatz	140
5.1.2	Zugbeobachtung von Betriebsbeamten vor Ort vor Einführung der HOA auf der freien Strecke nach dem realistischen Ansatz	144
5.1.3	Detektionshäufigkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch den Menschen nach dem realistischen Ansatz.....	151
5.2	Ableitung des Abstandes von HOA auf Grundlage der Lager-Heißläuferdetektion durch Personal im Jahr 1983 nach dem realistischen Ansatz	161
5.3	Ableitung des Abstandes von HOA nach dem pessimistischen Ansatz	166
5.3.1	Detektion von Lager-Heißläufern durch Betriebsbeamte im Bahnhof vor Einführung der HOA nach dem pessimistischen Ansatz	167
5.3.2	Zugbeobachtung von Betriebsbeamten vor Ort vor Einführung der HOA auf der freien Strecke nach dem pessimistischen Ansatz	168
5.3.3	Detektionshäufigkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch den Menschen nach dem pessimistischen Ansatz	171

5.3.4	Ableitung des Abstandes von HOA auf Grundlage der Lager- Heißläuferdetektion durch Personal im Jahr 1983 nach dem pessimistischen Ansatz	176
5.4	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse des Kapitels 5	176
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	183
6.1	Zusammenfassung	183
6.2	Ausblick.....	186
	Formelzeichenverzeichnis	188
	Tabellenverzeichnis	200
	Abbildungsverzeichnis	202
	Abkürzungsverzeichnis	208
	Literaturverzeichnis.....	210
Anhang	222
Anhang 1	223
Anhang 2	228
Anhang 3	230

1 Einleitung

Steigende Verkehrsleistungen auf der Schiene in Deutschland und ein rasanter technischer Fortschritt unterwerfen das Eisenbahnsystem ständigen Veränderungen. Für die Neuerungen müssen im Eisenbahnbereich jährlich viele sicherheitsrelevante Regelungen angepasst oder neu erstellt werden. Gleichzeitig gibt es nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen, die diese Regelungen auf deren sicherheitliche Wirksamkeit und Kosteneffizienz prüfen. Das Wort „sicherheitlich“ steht für „bezüglich der Sicherheit“.

Hier setzt diese Arbeit für die Detektion von Schäden an Radsatzlagern und Bremsen durch Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen an. Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen (HOA/FBOA) sind ortsfeste Anlagen und erfüllen wichtige sicherheitliche Aufgaben im Kontext der Systemeigenschaft der Spurführung. Die heutigen Anlagen sind das Ergebnis empirischer, technischer Entwicklungen. Öffentlich zugängliche wissenschaftliche Untersuchungen hierzu aus Deutschland sind nicht bekannt. Zu erwähnen ist die an der Technischen Universität Wien entstandene Dissertation [SCHÖ 05], die sich mit der Erstellung eines Ausbaukonzeptes für Sensorikkomponenten befasst, zu denen auch HOA/FBOA zu zählen sind. In Deutschland war ein solches Ausbaukonzept 2005 jedoch bereits vorhanden und zu großen Teilen umgesetzt.

Die Anforderung bzw. die Schutzfunktion von HOA/FBOA liegt, wie aus [MASC 2009] abgeleitet werden kann, im Bereich der Fahrzeugüberwachung. HOA/FBOA detektieren hohe Temperaturen an Eisenbahnfahrzeugen im Bereich der Räder, die durch Schäden an Radsatzlagern sowie durch Bremsdefekte, die zum Anliegen der Bremse während der Fahrt führen (Feste Bremse), verursacht werden. Denn derartige Schäden können, so der betroffene Zug nicht rechtzeitig detektiert und schnellstmöglich zum Halten gebracht wird, zu Entgleisungen und somit zum Verlassen des sicherungstechnisch gesicherten Regellichtraums führen. Der sicherungstechnisch gesicherte Regellichtraum beinhaltet den Regellichtraum über die Länge des gesicherten Fahrweges (siehe Anhang 1).

Auch die Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes (EUB) fordert in [EUB ROTH] in der darin enthaltenen Sicherheitsempfehlung eine Befassung mit dieser Problematik:

„Im Rahmen der Unfalluntersuchung wurde bereits im Jahr 2008 nachfolgende Sicherheitsempfehlung ausgesprochen:

Unter Berücksichtigung der Feststellungen im Rahmen der Unfalluntersuchung sowie der Erkenntnisse aus dem Gutachten der metallurgischen Untersuchung dürften in Fachkreisen Überle-

gungen anzustellen sein, ob und inwieweit der Abstand zwischen Heißläuferortungsanlagen (...) optimiert werden kann bzw. muss (...).“

Neben der wissenschaftlich begründeten Ermittlung des Abstandes zwischen zwei HOA/FBOA erscheint untersuchenswert, warum Züge mit einem durch eine HOA/FBOA entdeckten Defekt nach heutigen Vorschriften oftmals an einem Hauptsignal angehalten, d.h. gestellt, werden müssen und nicht an anderen Punkten einer Strecke.

Züge auf Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit über 160 km/h sind hinzukommend je nach gefahrener Geschwindigkeit in unterschiedlichen Entfernungen nach der detektierenden HOA/FBOA zu stellen. Dies hat zur Folge, dass eine Vielzahl von Hauptsignalen und damit verbundene kostenintensive sicherungstechnische Anlagen nur für den Zweck des Anhaltens von HOA/FBOA-detektierten Zügen erforderlich werden. Dies gilt selbst dann, wenn diese Hauptsignale für die Zugfolgeregelung und Zugreihenfolgeregelung nicht benötigt werden.

Der Zwang zum vermehrten Bau von sicherungstechnischen Anlagen für das Stellen von HOA/FBOA-detektierten Zügen im Netz der DB Netz AG und daraus folgend zur Instandhaltung und zum Umgang mit betrieblichen Einschränkungen bei deren Störung wird noch dadurch verstärkt, dass nicht alle Hauptsignale für das Stellen von HOA/FBOA-detektierten Zügen geeignet sind. Ein Stellen an Hauptsignalen in Tunneln ist z. B. nicht akzeptabel, da erwärmte Bauteile Brände an den Fahrzeugen verursachen können, mit ggf. verheerender Wirkung. Zusätzlich muss es für Rettungsdienste möglich sein, den Ort des Stellens zu erreichen.

Hohe finanzielle Einsparungen könnten erzielt werden, wenn detektierte Züge nicht am Hauptsignal gestellt werden müssten, sondern an einem anderen vorab festzulegenden Ort, z. B. an einer Hektometertafel. Dem Triebfahrzeugführer würden mithilfe der Mobilfunkkommunikation die erforderlichen Handlungsanweisungen zum Halt an diesem Ort übermittelt. Die Nachrüstung von Hauptsignalen, einschließlich der zugehörigen Sicherungstechnik, könnte entfallen. Gleichzeitig würde dem Planer von HOA/FBOA gegenüber den heutigen Planungsvorgaben eine Vielzahl weiterer geeigneter potenzieller Stellorte zur Verfügung stehen. In wieweit dies sicherheitlich vertretbar ist, wird in dieser Arbeit untersucht.

Bei einem Ausfall von HOA/FBOA greifen betriebliche Ersatzmaßnahmen. Ob die derzeit vorgesehenen Ersatzmaßnahmen ausreichend sind, um die gleiche Sicherheit wie bei funktionierenden HOA/FBOA zu gewährleisten, wurde ebenfalls bisher in keiner zugänglichen wissenschaftlichen Veröffentlichung überprüft. Dies wird in dieser Arbeit nachgeholt.

Zum Vorgehen in den nachfolgenden Kapiteln:

Kapitel 2 beinhaltet grundlegende Ausführungen zu heutigen Technologien und Techniken von HOA/FBOA sowie zu den diesbezüglichen betrieblichen und planerischen Regelungen.

Kapitel 3 befasst sich mit dem heutigen Systemdesign hinsichtlich der Abläufe ab der Detektion eines Defekts durch eine HOA/FBOA bis zum Aussetzen des beschädigten Fahrzeugs. Die Bewertung des Sicherheitsniveaus der heutigen Abläufe erfolgt anhand quantitativer Berechnungen.

In Kapitel 4 wird untersucht, unter welchen Bedingungen das Stellen eines durch eine HOA/FBOA detektierten Zuges an einer Hektometertafel statt am Hauptsignal und somit ohne zusätzliche sicherungstechnische Einrichtungen erfolgen kann. Hierzu werden neue Systemdesigns entwickelt und deren Sicherheitsniveau quantitativ berechnet. Anschließend erfolgt ein Vergleich zwischen den Sicherheitsniveaus des heutigen Systemdesigns und der in dieser Arbeit entwickelten Systemdesigns. Aus dem Ergebnis des Vergleichs werden Aussagen abgeleitet, inwieweit die neu entwickelten Systemdesigns aus sicherheitlichen Gesichtspunkten im Eisenbahnnetz eingeführt werden können.

Kapitel 5 überprüft die derzeit vorgeschriebenen Abstände zwischen HOA/FBOA. Neue Vorschläge für den diesbezüglichen Abstand werden aus den Berechnungen abgeleitet. Gleiches gilt für die derzeit gültigen Ersatzmaßnahmen beim Ausfall von HOA/FBOA.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und mögliche Themen für nachfolgende Arbeiten genannt.

2 Heutige Technologie und Technik von Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen

Bei Festen Bremsen gibt es zwei hauptsächliche Defektarten. Diese umfassen den Fall, dass während der Fahrt ein bzw. mehrere Bremsklötze am Rad schleifen. Durch die entstehende Wärme kann es zur Lockerung des Radreifens und ebenfalls wie beim Radsatzlagerschaden zur Entgleisung kommen. Dieser Zustand wird auch als “loser Radreifen“ bezeichnet. Durch das Schleifen kann darüber hinaus ein Funkenflug ausgelöst werden, dessen Folge ein Brand sein kann. Auch eine Fahrt mit Scheibenbremsen, an denen die Bremsbeläge anliegen, kann durch die einhergehende Entstehung von hohen Temperaturen zu Bränden führen.

Eine weitere Defektart bewirkt ein festgebremstes Rad. Hier fährt das Eisenbahnfahrzeug mit angelegter Bremse, wobei der Radsatz blockiert. Dabei können massive Flachstellen und Aufschweißungen entstehen, die schwere Fahrzeug- und Infrastrukturschäden verursachen, was ebenfalls zur Entgleisung mit einhergehendem Verlassen des sicherungstechnisch gesicherten Regellichtraums führen kann. Daher kann anders als in den Betrachtungen in [MASC 2009] in dieser Arbeit die sichere Spurführung des Fahrzeugs nicht vorausgesetzt werden.

In diesem Kapitel werden HOA/FBOA, die die genannten Schäden detektieren, hinsichtlich ihrer Technologie und Technik beschrieben. Dabei wird insbesondere auf deren Funktionen, die betrieblichen Regelungen im Umgang mit den Anlagen, auf wichtige Planungsgrundsätze und auf die heute vorgeschriebenen Ersatzmaßnahmen beim Ausfall von HOA/FBOA eingegangen.

Umfassende technische Untersuchungen im Zusammenhang mit HOA/FBOA gab es bereits in den 1950er Jahren [ETR 1956]. Seitdem wurden die Anlagen in einer Vielzahl weiterer Veröffentlichungen beschrieben, wie z. B. in [PÖHL 1992], [PÖHL 1994], [FREU 1996], [WETZ 1996], [EIS1 2000], [EIS2 2000], [EIS 2001], [KNEW 2006], [EIS 2011]. Daher werden sich nachfolgende diesbezügliche Ausführungen in diesem Kapitel auf den für das Verständnis dieser Arbeit erforderlichen Umfang beschränken.

Der Untersuchungsraum dieser Arbeit wird aus Gründen des Umfangs auf Deutschland und hier auf das Netz der DB Netz AG reduziert. Darüber hinaus erscheint diese Abgrenzung sinnvoll, da in der Literatur keine Hinweise auf Verbindungen zwischen HOA/FBOA verschiedener Länder vorhanden sind und diese Anlagen nur innerhalb des jeweiligen Nationalstaates wirken.

2.1 Funktion von Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen

Die grundlegende Funktionalität von HOA/FBOA besteht in der Bestimmung und Speicherung von Temperaturdaten im Bereich der Radsatzlager und der Bremse von Eisenbahnfahrzeugen. In diesem Zusammenhang wird in der Literatur statt von Radsatzlagern auch von Achslagern oder nur von Lagern gesprochen. Die drei Begriffe werden synonym verwendet. In [KLIM 2008] wird zu HOA/FBOA gesagt:

„Technisch gesehen handelt es sich bei den Anlagen um spezielle Infrarotsensoren, die im Gleisbereich montiert sind. Die Anlagen messen die Temperaturen der Achslager, Bremsklötze und Bremsscheiben der vorbeifahrenden Fahrzeuge. Die gemessenen Temperaturen werden direkt am Gleis mittels komplexer Softwarealgorithmen in einer Auswerteelektronik ausgewertet. Werden bestimmte Grenzwerte überschritten, erfolgt bei neueren Anlagen eine Meldung auf den PC der ‚Melde- und Überwachungseinrichtung‘ beim Fdl (ergänze: Fahrdienstleiter); bei älteren Anlagen besteht Überwachungseinrichtung aus einer kleinen speziellen Bedieneinheit mit optischer und akustischer Anzeige.“



Abbildung 1: Einschaltchienekontakt einer HOA/FBOA, der an der Schiene befestigt ist [FIS 2013]

Befährt ein Eisenbahnfahrzeug den Einschaltchienekontakt einer HOA/FBOA (Abbildung 1), der sich in Fahrtrichtung vor der HOA/FBOA befindet, wird die Anlage in einen messbereiten Zustand versetzt.

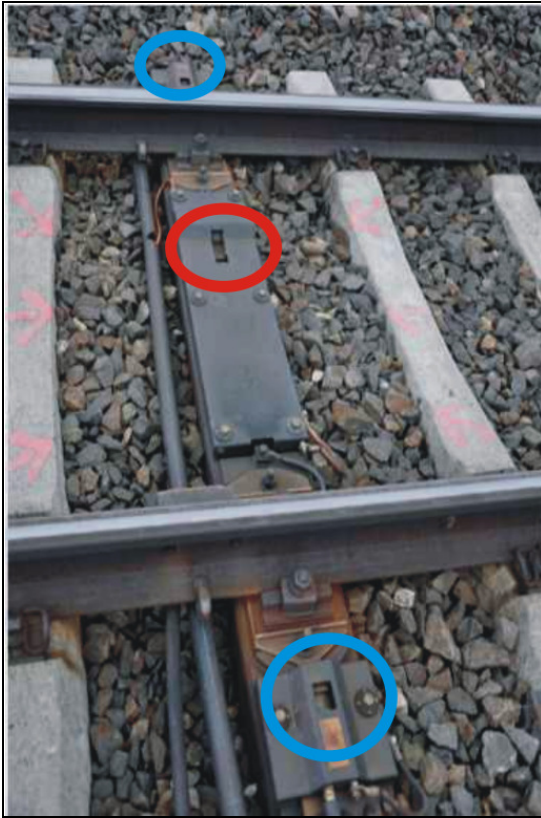


Abbildung 2: Öffnung zur Messung von Festen Bremse (rot umrandet) und zur Messung der Radsatzlagertemperatur (blau umrandet) [FIS 2013]

Die Sensoren für die Temperaturmessung befinden sich im Gleisbereich. In Abbildung 2 sind die Sensoren an einer Schwelle befestigt.

Diese Schwellen werden daher auch als Messschwelle oder wie in [SST 2013] als Gleisgeräteträger bezeichnet.

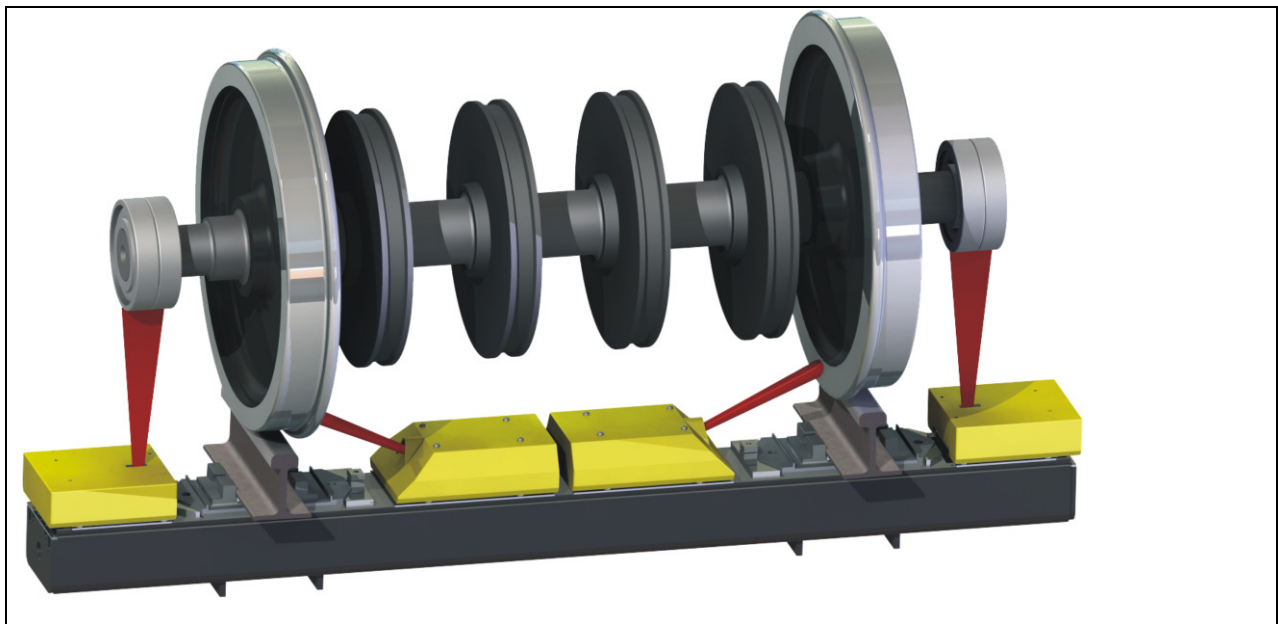


Abbildung 3: Prinzip der berührungslosen Temperaturmessung der Radsatzlager (außerhalb der Schienen) zur Erkennung von Radsatzlagerschäden sowie der Radreifen (innerhalb der Schienen) zur Identifikation von während der Fahrt anliegenden Bremsen [SST 2013]

Das Messprinzip der berührungslosen Temperaturmessung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die innerhalb der Schienen liegenden Sensoren messen die Temperatur der Radreifen. Dies dient zur Identifizierung der Festen Bremse. In Deutschland wird jedoch nur eine einseitige Temperaturmessung vorgenommen, sodass sich zwischen den Schienen nur ein Sensor zur Ermittlung der Radreifentemperatur befindet (siehe Abbildung 2), der neben der Radscheibentemperatur auch die der Scheibenbremsen erfasst.

Die Temperatur der Radsatzlager wird durch die außerhalb der beiden Schienen befestigten Sensoren gemessen.

Bei der DB Netz AG sind zumeist kombinierte HOA/FBOA im Einsatz. Singuläre HOA bzw. FBOA sind bei der DB Netz AG nur noch vereinzelt anzutreffen. Auch werden neu nach [RIL 859] nur noch kombinierte HOA/FBOA installiert.

Bei der Betrachtung der Arbeitsweise von HOA/FBOA ist zwischen Einrichtungs- und Zweirichtungsanlagen zu unterscheiden.

Einrichtungsanlagen detektieren in einem Gleis in eine Fahrtrichtung. Diese werden häufig eingesetzt, wenn ein Gleis fahrplanmäßig nur in eine Richtung befahren wird. Erfolgt jedoch nach dem Betriebsprogramm eine Befahrung in zwei Richtungen, kann pro Gleis auch eine Zweirichtungsanlage errichtet werden, welche in beide Fahrtrichtungen detektierend wirksam ist. Einrichtungsanlagen und Zweirichtungsanlagen werden jeweils als eine Anlage gezählt.

Doppelanlagen messen in zwei Gleisen und bestehen funktional aus zwei Einrichtungsanlagen oder zwei Zweirichtungsanlagen oder deren Kombination. Doppelanlagen werden als zwei Anlagen gezählt.

2.2 Betriebliche Abläufe ab Erreichen der Regelalarmschwellen

Weitere betriebliche und technische Festlegungen zu HOA/FBOA sind in den anerkannten Regeln der Technik enthalten. Eine Definition für den Begriff der anerkannten Regel der Technik, die in dieser Arbeit zugrunde gelegt werden soll, beinhaltet [VVBA 2010]: *„Der Begriff der anerkannten Regeln der Technik hat seine rechtliche Grundlage für den Bereich der EdB (ergänze: Eisenbahnen, die sich mehrheitlich im Besitz des Bundes befinden) im § 2 Abs. 1 EBO und wird wie folgt definiert: ‚Anerkannte Regeln der Technik sind alle auf Erkenntnissen und Erfahrungen beruhenden geschriebenen und ungeschriebenen Regeln der Technik, deren Befolgung beachtet werden muss, um Gefahren auszuschließen, und die in den betreffenden Fachkreisen bekannt sind und als richtig anerkannt werden.‘ Als anerkannte Regeln der Technik auf dem Gebiet der STE-Anlagen (ergänze: Signalanlagen, Telekommunikationsanlagen und elektrotechnische Anlagen) sind u. a. technische Normen (EN, DIN, DIN VDE) und Regelwerke der EdB zu bezeichnen.“*

Ähnlich wird in [VERO 2009] der Begriff der anerkannten Regeln der Technik festgelegt als *„die schriftlich festgelegte [sic!] Regeln, die bei ordnungsgemäßer Anwendung dazu dienen können, eine oder mehrere spezifische Gefährdungen zu kontrollieren“*. Jedoch ist die Reduktion der anerkannten Regeln der Technik in [VERO 2009] auf schriftliche festgelegte Regeln aus Sicht des Autors nicht gerechtfertigt, da auch nicht schriftlich festgelegte Regeln geeignet sein können, Gefährdungen zu kontrollieren.

Daher wird in dieser Arbeit auf die Definition in [VVBA 2010] zurückgegriffen.

Wichtige anerkannte Regeln der Technik für HOA/FBOA sind beispielsweise [RIL 859] und [RIL 408]. In dieser Arbeit werden sämtliche zitierte Richtlinien der DB AG als anerkannte Regeln der Technik eingestuft, da diese die Vorgaben der Definition in [VVBA 2010] erfüllen.

Im Zusammenhang mit HOA/FBOA werden in dieser Arbeit nur Zugfahrten, nicht jedoch Rangierfahrten betrachtet, da sich HOA/FBOA bis auf wenige Ausnahmen auf der freien Strecke befinden.

Rangierfahrten finden hingegen in der Regel innerhalb von Bahnhöfen und Anschlussstellen statt [NAU 2002]. Die betriebliche Behandlung von Zügen nach der Erkennung eines HOA/FBOA-Alarms ist in [RIL 408] geregelt. Zu Beginn werden die Zielgruppen genannt, für die diese Richtlinie erarbeitet worden ist:

- „- Mitarbeiter, die Aufgaben im Bahnbetrieb wahrnehmen,
 - Mitarbeiter, die Örtliche Richtlinien, Fahrpläne oder Betra aufstellen,
 - Mitarbeiter mit Planungs-, Leitungs- oder Überwachungsaufgaben im Bahnbetrieb,
 - Ausbilder im Bahnbetrieb“.

Regelalarmbezeichnung nach [RIL 859]	Regelalarmschwelle nach [RIL 859]	Bezeichnung aus [RIL 408.553]
Warmalarm	70 K ¹⁾	Warmläufer
Heißalarm	100 K ¹⁾	Heißläufer
Differenz Heiß	65 K	Heißläufer
Feste Bremse Warm	300 °C	Feste Bremse - warm
Feste Bremse Heiß	400 °C	Feste Bremse - heiß

Tabelle 1: Gegenüberstellung der verwendeten Begriffe im Zusammenhang mit HOA/FBOA-Detektionen in [RIL 859] und [RIL 408.0553], wobei die ersten drei Alarme durch Schäden am Radsatzlager und die letzten beiden Alarme durch Schäden an der Bremse verursacht werden; „¹⁾Ein Warm- bzw. Heißalarm wird bei einer Temperaturdifferenz von 70 bzw. 100 K zwischen der gemessenen und der Außentemperatur ausgelöst. Außentemperaturen >+30°C werden nicht berücksichtigt [RIL 859].“

Misst eine HOA/FBOA bei der Überfahrt eines Zuges Temperaturen der Regelalarmschwelle (siehe Tabelle 1) oder darüber, wird ein Alarm beim Fahrdienstleiter ausgelöst, in dessen Stellbereich das Stellsignal steht. Die Alarme, die HOA/FBOA auslösen, werden nachfolgend beschrieben und in [RIL 859] als Regelalarme bezeichnet.

„Im Alarmfall ergreift der Fahrdienstleiter unverzüglich die vorab festgelegten Maßnahmen im Sinne der Sicherheit des Eisenbahnbetriebs und stellt den Zug je nach Alarmart an den festgelegten Standorten [KLIM 2008].“

Aussagen zu den Alarmen sind sowohl in [RIL 859] als auch in [RIL 408] enthalten. Die Begrifflichkeiten in beiden Richtlinien sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Dabei fällt auf, dass die Begrifflichkeiten in beiden Richtlinien unterschiedlich sind.

Der Alarm „Differenz Heiß“ unterscheidet sich von den anderen Alarmen. Denn hier liegt keine Messung einer einzelnen Temperatur eines Bauteils zugrunde. Stattdessen beschreibt der Alarm „Differenz Heiß“ die Temperaturdifferenz zwischen dem linken und dem rechten Radsatzlager einer Achse bzw. einer Welle. Eine erhebliche Differenz zwischen den Temperaturen dieser bei-

den Radsatzlager kann darauf hindeuten, dass am Radsatzlager mit der höheren Temperatur ein Schaden vorliegt. Beträgt diese Temperaturdifferenz 65 K oder mehr, wird ein Alarm „Differenz Heiß“ ausgelöst.

Untersuchungen zu Veränderungen der genannten Regelalarmtemperaturen bzw. Regelalarmtemperaturdifferenzen erscheinen nicht sinnvoll. Eine Anhebung der Temperaturen würde zu einer späteren Erkennung des Schadens führen, als dies heute der Fall ist. Hingegen würde eine Reduktion der Temperaturen zu vermehrten Fehlalarmen führen, da Temperaturen, die durch die gewöhnlichen Drehbewegungen im Radsatzlager oder beim Bremsen entstehen, fälschlicherweise von der HOA/FBOA als Defekt interpretiert werden könnten.

Wird dem Fahrdienstleiter ein Alarm angezeigt, hat er nach [RIL 408.0553] wie folgt zu verfahren:

„(2) a) Wird Ihnen als Fahrdienstleiter durch eine Heißläuferortungsanlage oder Festbremsortungsanlage ein Heißläufer oder ‚Feste Bremse – heiß‘ angezeigt, müssen Sie den Zug an dem in den Örtlichen Richtlinien genannten Hauptsignal anhalten. In den Örtlichen Richtlinien können abweichende Regeln zum Anhalten des Zuges gegeben sein.

b) Wird Ihnen als Fahrdienstleiter durch eine Heißläuferortungsanlage oder Festbremsortungsanlage ein Warmläufer oder ‚Feste Bremse – warm‘ angezeigt, müssen Sie den Zug in dem in den Örtlichen Richtlinien genannten Bahnhof anhalten.

c) Teilen Sie dem Triebfahrzeugführer vor dem Anhalten des Zuges die Art der Meldung, den betroffenen Radsatz und die betroffene Zugseite mit.“

Bezüglich der nachfolgenden Untersuchung des detektierten Zuges wird in [RIL 408.0553] ausgeführt:

Nach dem Anhalten muss der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer die Unregelmäßigkeit mitteilen, sofern er dies nicht bereits vorher getan hat. Hat der Triebfahrzeugführer bei Anzeige durch eine HOA/FBOA das geortete Fahrzeug untersucht und dabei keine Unregelmäßigkeit festgestellt, muss er das davor und dahinter laufende Fahrzeug nach Wärmequellen absuchen. Anschließend hat der Triebfahrzeugführer dem Fahrdienstleiter den Befund und die zu treffenden Maßnahmen mitzuteilen, wie z. B. das Aussetzen des defekten Fahrzeugs aus dem Zugverband. Der Fahrdienstleiter dokumentiert die Unregelmäßigkeit und die ergriffenen Maßnahmen. Ist kein Wagenmeister verfügbar, muss der Triebfahrzeugführer das beschädigte Fahrzeug aussetzen, wenn es bei der Weiterfahrt den Bahnbetrieb gefährden könnte. Hat der Fahrdienstleiter einen Zug mit einem durch eine HOA/FBOA angezeigten Heißläufer an einem Einfahrsignal angehalten, darf er den Zug durch den Triebfahrzeugführer im Bahnhof untersuchen lassen, sofern dies in den Örtlichen Richtlinien für Mitarbeiter auf Betriebsstellen nicht verboten ist. Der Fahrdienstleiter hat den Zug in das durchgehende Hauptgleis einzulassen. Während der Einfahrt des Zuges dürfen

unmittelbar benachbarte Gleise nicht befahren werden. Bei der Einfahrt in den Bahnhof darf der Triebfahrzeugführer den Zug nur mit Schrittgeschwindigkeit bewegen. Weitere Regelungen aus [RIL 408.0553] sind in Anhang 2 enthalten.

2.3 Fahrzeugseitige Überwachung von Radsatzlagerschäden und Festen Bremsen

Treten die in Tabelle 1 genannten Alarme auf, liegen fahrzeugseitige Defekte vor. Die hieraus folgenden möglichen gefährlichen Ereignisse sind ebenfalls ein fahrzeugseitiges Konnotat. Es ist daher naheliegend, die Mess-, Detektions- und Auswerteeinrichtungen sowie die Informationsübertragung an den Triebfahrzeugführer bezüglich auftretender Alarme innerhalb des Zugverbandes zu implementieren. Dies würde deren linienförmige Überwachung ermöglichen. Warum die heutigen anerkannten Regeln der Technik die Aufgabe den Eisenbahninfrastrukturunternehmen zuweisen, ist nicht nachvollziehbar. Es lässt sich vermuten, dass der Stand der Technik zum Zeitpunkt der Einführung der HOA/FBOA keine fahrzeugseitige Realisierung der HOA/FBOA-Funktionalitäten ermöglichte. Die Ausrüstung von Fahrzeugen mit Messsystemen zur Überwachung von Warm- und Heißzuständen an Rädern und Radsatzlagern wird auch in [TSI HS] gefordert. Danach müssen Züge mit einer Höchstgeschwindigkeit von mehr als 249 km/h mit Messapparaturen im Fahrzeug (Onboard-Units) ausgestattet sein, die Radsatzlagerüberwachungen durchführen können. Für Züge mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 249 km/h sind Onboard-Units nicht zwingend vorgeschrieben, aber optional möglich.

Nach [TSI HS] müssen diese Einrichtungen eine Beeinträchtigung des Zustands der Radsatzlager durch Überwachung ihrer Temperatur, ihrer dynamischen Frequenzen oder eines anderen geeigneten Merkmals zur Feststellung des Radsatzlagerzustands erkennen. Zudem haben diese Einrichtungen eine Instandhaltungsaufforderung auszugeben sowie abhängig vom Grad der Beeinträchtigung der Radsatzlager gegebenenfalls erforderliche Betriebseinschränkungen anzuzeigen.

Das Überwachungssystem muss sich an Bord der Fahrzeuge befinden. Die Diagnosemeldungen sind dem Triebfahrzeugführer anzuzeigen.

Allerdings enthält [TSI HS] eine Vielzahl offener Punkte. So ist für die fahrzeugseitige Diagnose bis heute nicht geklärt, ab welcher Temperatur welche Regelalarmschwellen erreicht werden. Aktuelle Aktivitäten, diese Regelungslücke zu schließen, sind nicht bekannt.

Im Rahmen der nationalen Vorschriften gibt es ebenfalls keine Ausführungen zu den rad- und achsüberwachenden Onboard-Units. Aus diesem Grund gibt es bisher in Deutschland kein zugelassenes Fahrzeug, das die Funktionen einer HOA/FBOA für sich selbst übernehmen könnte.

Die fahrzeugseitige HOA/FBOA-Detektion wird auch in den nächsten Jahren stationäre Anlagen nicht ersetzen können. Um dies zu erreichen, müssten fahrzeugseitige HOA/FBOA zugelassen sowie in neue und bestehende Eisenbahnfahrzeuge eingebaut werden. Weiterhin wären auf allen Strecken, die von Fahrzeugen mit einer Höchstgeschwindigkeit unter 250 km/h befahren werden können, weiterhin streckenseitige HOA/FBOA vorzuhalten. Darüber hinaus gilt für alle derzeit mit einer Höchstgeschwindigkeit von mehr als 249 km/h verkehrenden Züge Bestandsschutz. Auch ist zu bedenken, dass es gesetzlich keine Beschränkung der Nutzungsdauer für Eisenbahnfahrzeuge gibt, sodass diese 50 Jahre und länger im Einsatz sein können. Die vertiefende Betrachtung einer fahrzeugseitigen Überwachung würde daher eine rein theoretische Arbeit entstehen lassen, deren praktischer Wert mangels Umsetzbarkeit nicht darstellbar wäre. Aus diesem Grund wird die fahrzeugseitige Überwachung in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

2.4 Ausgewählte Planungsgrundsätze für Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen

[RIL 859] wendet sich an einen Personenkreis, der sich mit der Planung von HOA/FBOA auseinandersetzt. In [RIL 859] wird ausgeführt, dass für Züge mit einem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder „Feste Bremse Heiß“ in der Regel ein Einfahrtsignal als Stellort festzulegen ist. Es dürfen auch Zwischen-, Ausfahr- oder Blocksignale von Abzweig- oder Überleitstellen vorgesehen werden, wenn es aufgrund der örtlichen Gegebenheiten notwendig ist.

Nach [RIL 819.1601], welche die Vorgängerrichtlinie von [RIL 859] war und bis 04.04.2013 angewendet wurde, waren folgende Abstände zwischen zwei HOA/FBOA anzustreben:

- für Schnellfahrstrecken (SFS) mit einer maximal zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit von mehr als 200 km/h: 30 bis 35 km,
- für übrige Strecken: 40 bis 70 km.

In [RIL 859] wird hierzu festgelegt:

„Die Streckenanteile des Transeuropäischen Netzes TEN (Hochgeschwindigkeitsverkehr und konventioneller Verkehr) der DB Netz AG müssen mit HOA/FBOA ausgestattet werden.

Weitere Strecken sind in Abstimmung mit der Anlagenplanung mit HOA/FBOA auszustatten (insbesondere Strecken mit überregionalem Güterverkehr). Folgende maximalen [sic!] Abstände zwischen zwei HOA/FBOA sind einzuhalten:

- *Strecken mit $v > 200$ km/h (SFS) : 35 km*
- *übrige Strecken : 70 km“*

Weiter wird in [RIL 859] ausgeführt: *„Ist am Standort der HOA/FBOA das Fahren auf dem Gegengleis ständig eingerichtet oder dessen Einrichtung geplant, so ist die Ausrüstung des Gegengleises mit HOA/FBOA erforderlich.“*

Zwar sind die HOA/FBOA-Abstände somit festgelegt, jedoch ist die Auswahl der HOA/FBOA-Standorte an weitere Rahmenbedingungen gebunden. Zur Standortwahl der HOA/FBOA sagt [RIL 859] aus, dass die Standorte so im Streckennetz zu wählen sind, dass:

„- bei Streckenverzweigungen (Ausfädelungen) der Stellort, an dem der Zug zu stellen ist, noch vor der Verzweigung liegt

- beim Zusammenlauf von Strecken die Messstelle nach der Einfädelung liegt

- mehrere HOA/FBOA möglichst einer gemeinsamen Bedieneinrichtung zugeordnet werden können

- sie an mehrgleisigen Strecken möglichst einen [sic!] gemeinsamen Raum zur Unterbringung der Standorteinrichtung zugeordnet werden, wenn die Stellorte es ermöglichen“

Weiterhin wird in [RIL 859] gesagt, dass für das Stellen von detektierten Zügen der Abstand zwischen dem Hauptsignal und der HOA/FBOA für drei Geschwindigkeitsstufen, mit der der Zug die HOA/FBOA überfährt:

- bis 160 km/h,
- über 160 km/h bis 250 km/h und
- über 250 km/h

zu errechnen ist. Für die Geschwindigkeitsstufe bis 160 km/h wird folgende Formel nach [RIL 859] verwendet:

Formel 1

$$L_H = L_V + L_{VS} + L_Z + (t_H + 12) * \frac{10}{36} * v_{max}.$$

Darin bedeuten nach [RIL 859]:

- *„ L_H [m] = Richtwert für Abstand zwischen der HOA/FBOA und dem Stellort, an dem der Zug anzuhalten ist.*
- *L_V [m] = örtlich vorhandener Vorsignalabstand (Bremsweg der Strecke) (...)*
- *„ L_{VS} [m] = Sichtpunkt auf das Vorsignal (...)*

- „ L_z [m] = zulässige Zuglänge der Zuggattung, die mit der größten zulässigen Geschwindigkeit auf der Strecke verkehrt bzw. maximale Zuglänge der Zuggattung der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe.“
- t_H [s] = Zeit, die für betriebliche Handlungen des Fahrdienstleiters (z. B. Stellen des Signals) erforderlich ist. Die Zeit kann je nach den betrieblichen Erfordernissen zwischen 30s und 45s festgelegt werden.“
- „12 [s] Maximale Durchlaufzeiten der Meldeanlagensysteme und der Datenübertragung und Verarbeitung (...)“
- „ v_{max} [km/h] = maximal zulässige Geschwindigkeit der jeweils betrachteten Geschwindigkeitsstufe“
- Ergänzung: $\frac{10}{36}$ = Faktor zur Einheitensynchronisierung.

Die Erläuterung für L_{VS} , dies sei der Sichtpunkt auf das Vorsignal, erscheint verbesserungswürdig, da ein Punkt nicht mit der Einheit [m] angegeben wird. Stattdessen wäre der Begriff der Sichtstrecke treffender.

Für Geschwindigkeitsstufen über 160 km/h sind nach [RIL 859] gesonderte Berechnungen erforderlich in Abhängigkeit des Bremsverhaltens der Züge.

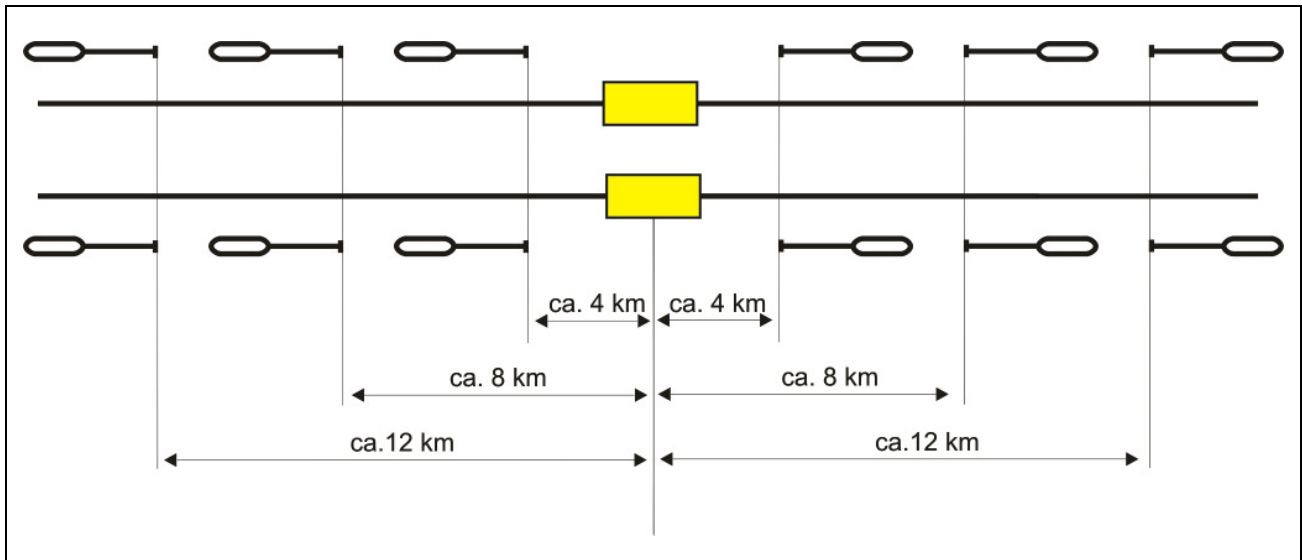


Abbildung 4: Darstellung der Anordnung der nach [RIL 859] erforderlichen 12 Stellsignale im Umkreis von ca. 12 km einer HOA/FBOA-Doppelanlage (gelb), bestehend aus zwei Zweirichtungsanlagen und eingerichtetem Gleiswechselbetrieb bei Strecken mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von mehr als 250 km/h

Bei Strecken mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von mehr als 250 km/h und eingerichtetem Gleiswechselbetrieb folgt daraus, dass bei einer Doppelanlage mit zwei Zweirichtungsanlagen für die drei Geschwindigkeitsstufen im Umkreis der HOA/FBOA von ca. 12 km 12 Stellsignale (Abbildung 4) und mindestens ebenso viele Vorsignale benötigt werden. Hinsichtlich der Darstellung der HOA/FBOA sei erwähnt, dass für diese in den Richtlinien der DB AG kein Symbol festgelegt wurde. In dieser Arbeit wird hierfür ein gelbes Viereck genutzt.

Eine Verlängerung des Richtwertes bis max. 33 % für den Abstand zwischen der HOA/FBOA und dem Stellort, an dem der Zug anzuhalten ist, wird toleriert. Eine Verlängerung um mehr als 33 % ist nach [RIL 859] nur in Ausnahmefällen zulässig, wenn die Konstellation der Stellorte keine andere Möglichkeit für die Anordnung der HOA/FBOA zulässt. In diesem sehr seltenen Fall, z. B. bei sehr langen Streckenabschnitten im Tunnel, gilt:

„In diesem Fall sind ergänzende Maßnahmen zu treffen. Hierbei ist zu regeln, dass ein mittels HOA/FBOA georteter Zug unverzüglich über Zugfunk informiert wird, eine Betriebsbremsung einzuleiten. Die Information erfolgt mittels zugbezogenem Einzelruf. Kommt der Einzelruf nicht zustande, ist der Auftrag an den Triebfahrzeugführer zum Anhalten des Zuges erneut zu geben und dabei durch Sammelruf bzw. Gruppenruf an alle Tf (ergänze: Triebfahrzeugführer) anzukündigen. Ist aus technischen Gründen der zugbezogene Einzelruf nicht möglich (...), ist vorzugsweise die Verwendung des Notrufes vorzusehen. Die Regelungen zum Anhalten des Zuges mittels Zugfunk sind in die örtlichen [sic!] Richtlinien aufzunehmen. Die Anweisung zum Anhalten des Zuges mittels Zugfunk ist dem Fahrdienstleiter im Meldetext der Bedieneinrichtung anzuzeigen [RIL 859].“

Nach Erfahrungen des Autors werden für den Meldetext im Eisenbahnbereich weitere Begriffe verwendet, wie z. B. Handlungstext bzw. Alarmtext. Für eine Einheitlichkeit der Begriffsverwendung wird für diese Arbeit folgendes festgelegt:

Der von der HOA/FBOA ausgelöste Alarm wird als Alarm bzw. Regelalarm bezeichnet. Der Text, der dem Fahrdienstleiter diesbezüglich angezeigt wird, der neben dem Hinweis auf den Alarm auch Angaben mit Handlungsanweisungen enthält, wird als HOA-Alarmmeldung benannt.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass weitere Vorgaben zu HOA in [TSI SRT] enthalten und auszugsweise in Anhang 3 eingestellt sind. Die Angaben in [TSI SRT] sind jedoch für diese Arbeit nicht relevant.

2.5 Ersatzmaßnahmen beim Ausfall von Heißläufer- oder Festbremsortungsanlagen

Fällt eine HOA oder FBOA aus, mit der Folge, dass Regelalarme nicht oder nicht korrekt detektiert werden, wird der regelkonforme Zustand verlassen. Derzeit für diesen Fall geregelte Ersatzmaßnahmen, die als anerkannte Regeln der Technik anzusehen sind, werden nachfolgend beschrieben und in Abbildung 5 zusammengefasst.

In [RIL 408.0641], Abschnitt 5 wird zu Ersatzmaßnahmen ausgeführt:

„(2) a) Fällt eine Heißläuferortungsanlage oder Festbremsortungsanlage auf Strecken mit einer zulässigen Geschwindigkeit von mehr als 200 km/h aus, müssen Sie als Fahrdienstleiter sofort die für die benachbarten Anlagen zuständigen Fahrdienstleiter verständigen. Beim Ausfall von zwei oder mehr benachbarten Anlagen müssen Sie als Fahrdienstleiter, der für die zuletzt ausgefallene Anlage zuständig ist, die Eingabe einer vorübergehenden Langsamfahrstelle mit 200 km/h in die LZB bzw. in ETCS für den zwischen den noch betriebsbereiten Anlagen liegenden Gleisabschnitt veranlassen. In den Örtlichen Richtlinien ist für jede Langsamfahrstelle ein vorbereiteter Eingabetext vorhanden.

b) Die Standorte der dem Fahrdienstleiter zugeteilten Heißläuferortungsanlagen und Festbremsortungsanlagen nach a) und der jeweils zwei davor und dahinter gelegenen Anlagen und die zuständigen Fahrdienstleiter sind in den Örtlichen Richtlinien angegeben.“

Weitere Informationen zu Maßnahmen bei Störungen von HOA oder FBOA sind in [KLIM 2008] enthalten:

- *„HOA-/FBOA nach 24 Stunden oder 100 Zügen nicht wieder betriebsbereit*
 - *Information der Aufsichtsbehörde ‚Eisenbahnbundesamt‘ [sic!] über die HOA Störung durch den anlagenverantwortlichen Bezirksleiter für die Telekommunikationsanlagen mit Beschreibung der Störungsursache, Angaben über das voraussichtliche Störungsende und die geplanten/ergriffenen Ersatzmaßnahmen.*
 - *Eine Kopie dieser Meldung an den Eisenbahnbetriebleiter [sic!] (...) zu senden“.*
- *„HOA-/FBOA nach 72 Stunden nicht wieder betriebsbereit oder zwei benachbarte HOA/FBOA nach 4 Stunden nicht wieder betriebsbereit*
 - *Zugbeobachtung an den in den Örtliche [sic!] Richtlinien für Mitarbeiter auf Betriebsstellen oder Auftragsbuch benannten Stellen einführen (...)“*
- *„Zugbeobachtung nicht an allen festgelegten Standorten sichergestellt*

– Reduzierung der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit für Güterzüge auf V_{\max} 100 km/h.“

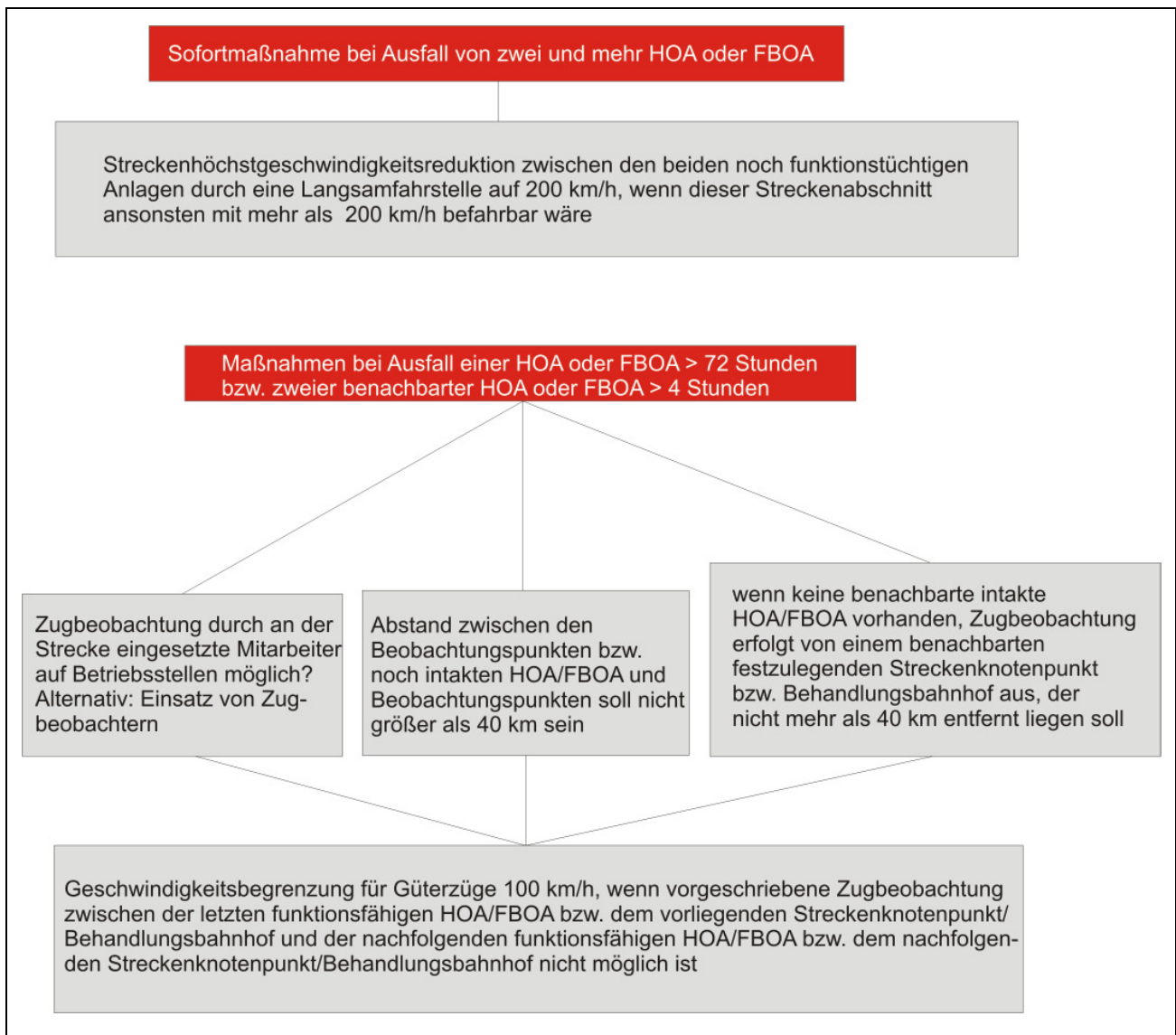


Abbildung 5: Übersicht der heutigen Maßnahmen bei Ausfall von HOA oder FBOA, basierend auf [RIL 408.0641], [END 2007] und [KLIM 2008]

In [END 2007] wird ergänzt, dass bei Ausfall einer HOA oder FBOA von mehr als 72 Stunden bzw. zweier benachbarter HOA oder FBOA von mehr als 4 Stunden der maximale Abstand zwischen den funktionsfähigen HOA bzw. FBOA und den zur Zugbeobachtung eingesetzten Mitarbeitern nicht größer als 40 km sein darf. Sind mehrere Zugbeobachter einzusetzen, so sind diese wechselseitig auf der einen bzw. anderen Gleisseite vorzusehen. Damit können in regelmäßigen Abständen Unregelmäßigkeiten beidseits der Zugflanken festgestellt werden. Das bedeutet, dass seitenselektiv mindestens nach 80 km eine Zugbeobachtung erfolgt.

3 Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

Überfährt ein Zug eine HOA/FBOA und löst dabei einen Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“ aus, werden Abläufe angestoßen, an deren Ende ein Zielzustand erreicht werden soll. Die Gesamtheit der Abläufe wird mit dem Oberbegriff Systemdesign bezeichnet. Diese Abläufe enthalten Aspekte der Technologie, inklusive prozessualer Punkte und menschlicher Handlungen sowie Aspekte der hierbei mitwirkenden Technik. Die einzelnen Abläufe beinhalten sinnvolle funktionale Zusammenhänge und bestehen aus detaillierteren Ereignissen, die einzelnen Menschen oder einzelnen technischen Anlagen zugeschrieben werden können. Die Gesamtheit aller Ereignisse wird als Ereigniskette bezeichnet. Ob das Versagen des einzelnen Ereignisses bereits zum Versagen der Ereigniskette führt, hängt von der Frage ab, ob es weitere Ereignisse gibt, die das Versagen eines Einzelereignisses kompensieren. Versagt ein Ereignis, besagt dies, dass das Ereignis nicht eintritt, jedoch hätte eintreten sollen. Es wird in diesem Fall nachfolgend auch von einem Versagensereignis gesprochen.

Dieses Kapitel befasst sich mit der Bestimmung des Sicherheitsniveaus der nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik auftretenden Ereignisketten. Am Beginn der nachfolgend betrachteten Ereignisketten steht immer das Überfahren einer HOA/FBOA durch einen Zug, der einen Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“ auslöst. Die Ereigniskette wird als erfolgreich bezeichnet, wenn der schadhafte Zug am vorab festgelegten Stellort angehalten und das defekte Fahrzeug nachfolgend aus dem Zug ausgesetzt wurde. Dies stellt den zu erreichenden Zielzustand und somit das Ende der Ereigniskette dar.

Zur sicherheitlichen Bewertung von Ereignisketten können qualitative und quantitative Methoden genutzt werden. Qualitative Methoden beschreiben Sicherheitsthemen und leiten daraus sicherheitliche Schlussfolgerungen ab. Mithilfe quantitativer Methoden werden konkrete Kennwerte ermittelt, die sicherheitliche Vergleiche zwischen den Ereignisketten ermöglichen. Ein Kennwert, der u. a. in [HINZ 1993] genutzt wurde, ist die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit einer Ereigniskette. Darin werden Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Ereignisse einer Ereigniskette quantifiziert und daraus die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette ermittelt. Als Versagenswahrscheinlichkeit wird die Wahrscheinlichkeit definiert, mit der ein Ereignis einer Ereigniskette versagt, d. h. beispielsweise eine Anlage nicht verfügbar ist. Die Verfügbarkeit wird

in [FELT 2009] definiert als die Wahrscheinlichkeit, mit der ein System zu einem beliebigen, zufälligen Zeitpunkt im betriebsbereiten Zustand ist. Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit beinhaltet die Wahrscheinlichkeit, dass die Ereigniskette versagt. Zwei wichtige Erkenntnisse können gewonnen werden:

- a) Es wird darstellbar, welchen Einfluss die Versagenswahrscheinlichkeit eines einzelnen Ereignisses auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette hat.
- b) Unterschiedliche Ereignisketten werden hinsichtlich ihrer Gesamtversagenswahrscheinlichkeit vergleichbar.

Aus den Gründen a) und b) wird für den Vergleich der in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit genutzt.

Aufgrund deren Diversität muss für jedes Ereignis neu quantifiziert werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit dieses versagt. Da in den nachfolgenden Ereignisketten keine bedingten Wahrscheinlichkeiten auftreten, sind die Versagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisse unabhängig von der jeweiligen Ereigniskette.

In Kapitel 3 werden die nach den gültigen anerkannten Regeln der Technik vorgeschriebenen, diesbezüglichen Ereignisketten mit den Einzelereignissen für PZB-überwachte und LZB-geführte Züge beschrieben, quantifiziert und deren Gesamtversagenswahrscheinlichkeit berechnet. Diese Ereignisketten sind Referenzereignisketten für die in Kapitel 4 zu quantifizierenden Ereignisketten, die aus den neu in dieser Arbeit entwickelten Systemdesigns resultieren.

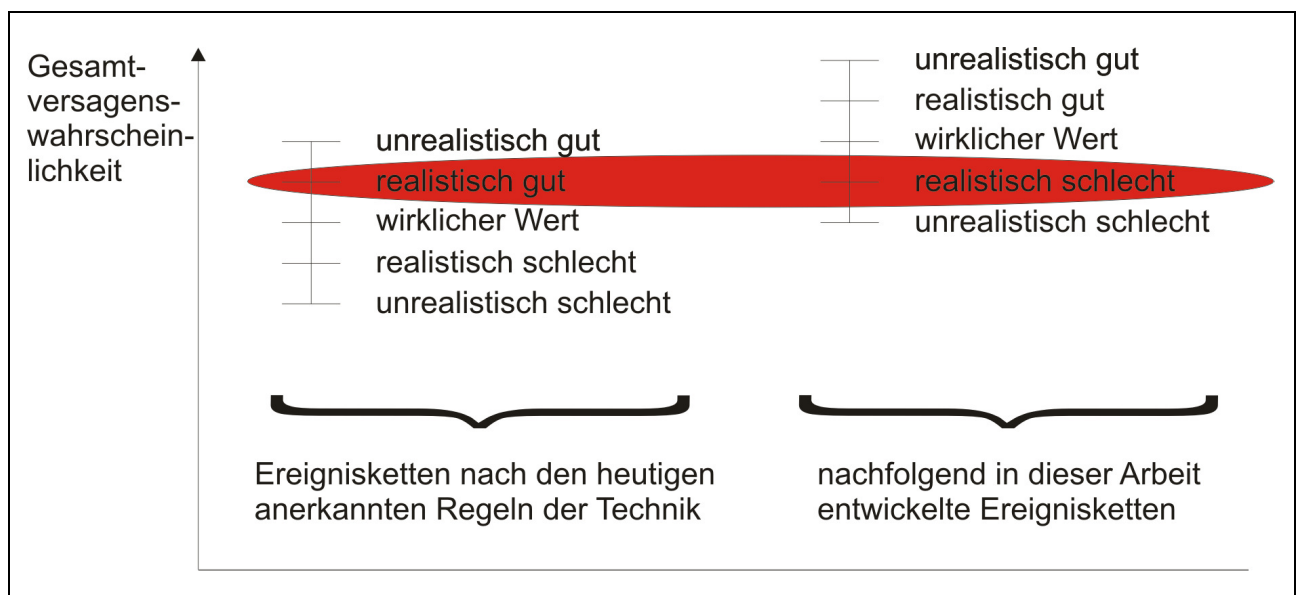


Abbildung 6: Darstellung der rot gekennzeichneten Vergleichsebene, in der die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik und der nachfolgend in dieser Arbeit entwickelten Ereignisketten verglichen werden

Daher werden die in Kapitel 3 betrachteten Ereignisketten realitätsnah mit positiver Tendenz bzw. zur positiven Seite berechnet. D. h. die quantitativen Annahmen für die Ereignisse der Referenzereignisketten werden tendenziell optimistisch und somit mit einer gegenüber der Realität eher geringeren Versagenswahrscheinlichkeit erfolgen. Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten nach dieser Rechenweise werden nachfolgend als „realistisch gut“ bezeichnet (siehe Abbildung 6).

Dagegen sollen die in Kapitel 4 quantifizierten Ereignisse der neuen Systemdesigns zur sicheren Seite, d. h. mit tendenziell eher erhöhter Versagenswahrscheinlichkeit berechnet werden. Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten nach dieser Rechenweise werden nachfolgend als „realistisch schlecht“ (siehe Abbildung 6) bezeichnet.

Danach erfolgt der Vergleich der „realistisch schlechten“ Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der in Kapitel 4 entwickelten Systemdesigns mit den Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der in Kapitel 3 „realistisch gut“ quantifizierten Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik. Grund hierfür ist, dass die wirklichen Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten mangels vorhandener Daten nicht exakt bestimmt werden können. Daher gewährleistet dieses Vorgehen, dass die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der neuen Systemdesigns im Vergleich zu denen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik nicht zu positiv, d. h. zu gering ausfallen. Dennoch sollten die Abschätzungen so realistisch wie möglich ausfallen, um für die neu entwickelten Systemdesigns keine unnötig hohen Anforderungen zu generieren.

An dieser Stelle folgt eine Betrachtung zu den Begriffen Risiko, Gefährdung und Sicherheit, um anschließend den Zusammenhang zu Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Ereignisketten herstellen zu können.

Zur Definition der Begriffe Risiko, Gefährdung und Sicherheit und deren Zusammenhang gibt es bereits eine Vielzahl von Schriften z. B. [EN 50126], [AND 2008], [MASC 2012]. Die folgenden Ausführungen beschränken sich daher nachfolgend auf den für diese Arbeit erforderlichen Umfang.

Die Gefährdung ist in [EN 50129] als Bedingung, die zu einem Unfall führen kann, definiert worden. In [AND 2008] wird ausgeführt: *„Eine Gefährdung (...) wird somit mit etwas Konkretem (Bedingung, Umstand) verbunden.“* Eine Gefährdung liegt vor, wenn eine Ereigniskette den genannten Zielzustand nicht erreicht, d. h. der detektierte Zug kommt entweder nicht am vorgesehenen Stellort zum Halten oder das defekte Fahrzeug wird nicht aus dem Zugverband entfernt.

Risiko wird in [MASC 2012] als Produkt bzw. Wahrscheinlichkeit eines unerwünschten Ereignisses und dessen Schadensausmaß bezeichnet. In [EN 50126] enthalten ist eine Definition des Begriffes Sicherheit: *„Das Nichtvorhandensein eines unzulässigen Schadensrisikos.“* Die Begriffe Schadensrisiko und Risiko sind gleichzusetzen.

Um neue Systemdesigns im Eisenbahnbereich einführen zu können, für die bisher keine anerkannten Regeln der Technik vorhanden sind, muss der Nachweis gleicher Sicherheit gemäß [EBO 2012], § 2 Abs. 2 erfüllt sein: *„Von den anerkannten Regeln der Technik darf abgewichen werden, wenn mindestens die gleiche Sicherheit wie bei Beachtung dieser Regeln nachgewiesen ist.“* Danach müssen neu entwickelte Systemdesigns mindestens gleich sicher sein wie Systemdesigns, die heute im Einsatz sind und den anerkannten Regeln der Technik genügen.

Erreicht eine in dieser Arbeit betrachtete Ereigniskette nicht den gewünschten Zielzustand, kommt der detektierte Zug entweder nicht am vorgesehenen Stellort zum Halten bzw. das defekte Fahrzeug verbleibt im Zugverband. Dies ist inakzeptabel. Daher ist es für den Vergleich der in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten irrelevant, wie hoch das Schadensausmaß ist. Für die Betrachtung der Sicherheit bleibt hinsichtlich des definitionsimmanenten Schadensrisikos nur noch die Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses, d. h. die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette. Danach ist der Nachweis gleicher Sicherheit gemäß [EBO 2012], § 2 Abs. 2 erbracht, wenn die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit von Ereignisketten der in dieser Arbeit entwickelten Systemdesigns nicht größer ist als die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisketten nach den heutigen Systemdesigns. Diese Annahme ist begründbar, da angenommen werden kann, dass heutige Ereignisketten sicherheitlich akzeptiert sind.

In den Kapiteln 3 und 4 dieser Arbeit nicht berücksichtigt wird das Erkennen unzulässiger Erwärmungen von Radsatzlagern und Bremsenrichtungen durch Personale vor Ort bei der Vorbeifahrt von Schienenfahrzeugen. Denn es war eben gerade das Ziel der heute vorhandenen HOA/FBOA, deren Wegfall an der Strecke zu kompensieren, auch wenn Personale vor Ort ggf. noch derzeit vereinzelt an der Strecke tätig sind.

Nach den Ausführungen zu HOA/FBOA in Kapitel 2 können weitere Vereinfachungen und Präzisierungen vorgenommen werden:

1. Das Hauptsignal, an dem ein HOA/FBOA-detektierter Zug zu stellen ist, wird nachfolgend als Stellsignal bezeichnet.
2. HOA/FBOA messen die Temperaturen der Achslager bzw. Radsatzlager, Bremsklötze und Bremsscheiben vorbeifahrender Fahrzeuge [KLIM 2008]. **Die Bauteile Achslager, Bremsklötze und Bremsscheiben, deren Temperaturen an einer HOA/FBOA gemessen werden, sind nachfolgend unter dem Begriff „Achse“ zusammengefasst.**
3. Züge, bei denen eine HOA/FBOA einen Warmalarm oder einen Alarm „Feste Bremse Warm“ festgestellt hat, werden in [RIL 408.0553] hinsichtlich des Stellweges weniger restriktiv betrachtet im Vergleich zum Heißalarm, zum Alarm „Differenz Heiß“ und zu einem Alarm „Feste Bremse Heiß“. Züge mit einem Warmalarm oder einem Alarm „Feste Bremse Warm“ dürfen bis zu einem vorab festgelegten Bahnhof weiterfahren. Es gibt keine Ein-

schränkungen, wie weit der festgelegte Bahnhof maximal von der HOA/FBOA entfernt sein darf. Daher werden in dieser Arbeit nur die restriktiver zu behandelnden Alarmer Heißalarm, „Differenz Heiß“ und „Feste Bremse Heiß“ betrachtet.

4. Für das Stellen des detektierten Zuges und für das Aussetzen des defekten Fahrzeugs gelten bei einem Alarm „Feste Bremse Heiß“ die gleichen Regeln wie für Züge mit einem Heißalarm und dem Alarm „Differenz Heiß“. **Da in diesen Alarmen das Wort „heiß“ enthalten ist, werden diese nachfolgend vereinfachend auch als „heiße Alarmer“ und die zugehörige Achse als Heißläufer bzw. Heißläuferachse bezeichnet.**
5. **HOA/FBOA werden im Folgenden in dieser Arbeit vereinfachend als HOA benannt.**
6. Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass sich in jedem HOA-detektierten Zug nur ein Fahrzeug mit einem Schaden am Radsatzlager oder einem Bremsdefekt befindet. In der zugänglichen Literatur ist kein Fall enthalten, bei dem gleichzeitig mehrere Defekte an Radsatzlagern oder Bremsdefekte innerhalb eines Zuges durch eine HOA detektiert wurden. Selbst wenn nicht auszuschließen ist, dass z. B. alle Bremsen an einem Eisenbahnfahrzeug ungewollt angelegt bleiben, dürfte es sich insbesondere beim Auftreten von heißen Alarmen aufgrund von Radsatzlagerschäden um ein sehr seltenes Ereignis handeln, das in dieser Arbeit keine Berücksichtigung findet und für das hinzukommend keine Daten verfügbar sind.
7. Sekundäre Ereignisse, wie Terroranschläge, Blitzeinschläge oder Sabotage, werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

3.1 Stellung von Zügen mit detektiertem Heißläufer und Aussetzen des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik

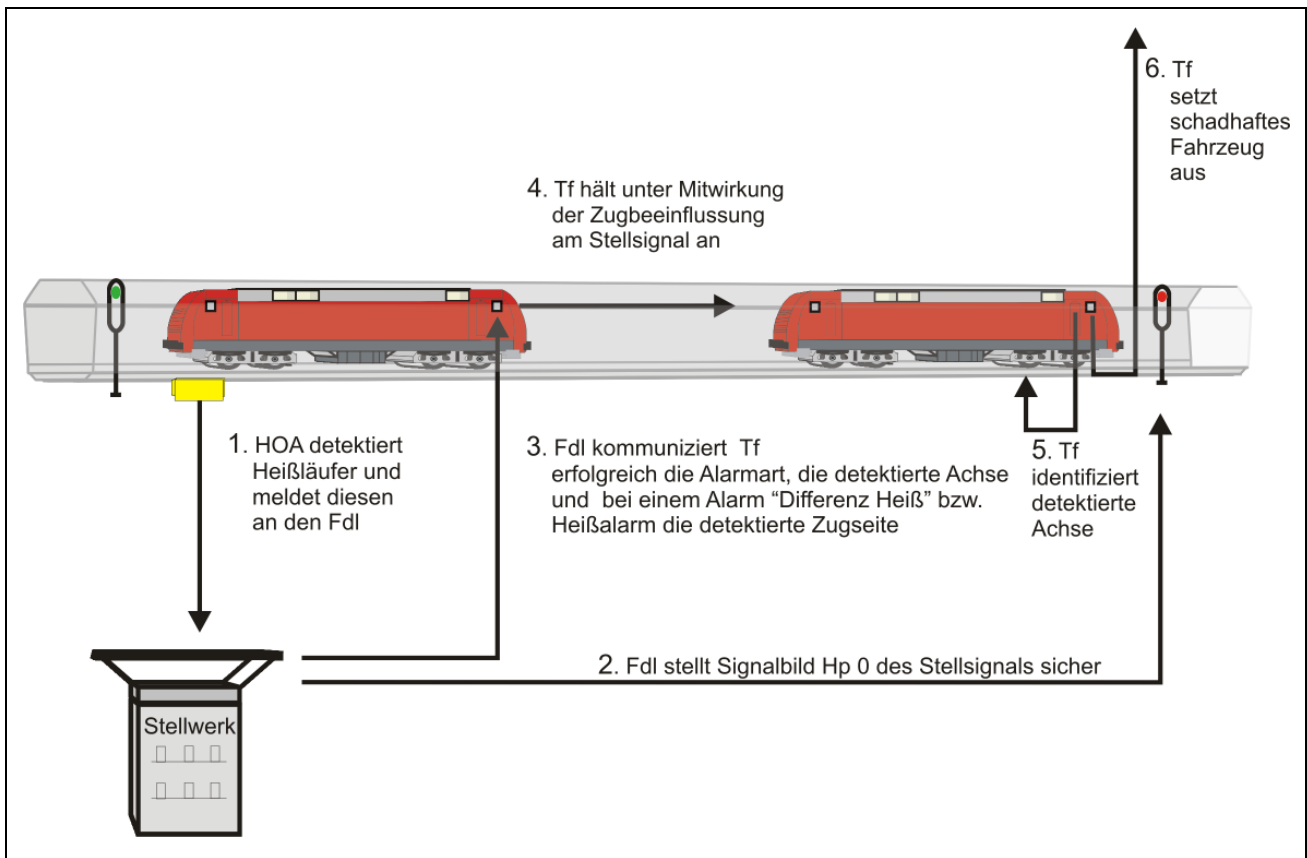


Abbildung 7: Darstellung der Abläufe 1. bis 6. des Stells von Zügen mit detektiertem Heißläufer und des Aussetzens des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik

In Abbildung 7 werden die Abläufe des Stells von Zügen mit detektiertem Heißläufer und das Aussetzen des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik dargestellt. Der Zug wird vom signaltechnisch gesicherten Regellichraum, der von der Darstellung in Abbildung 7 einem Tunnel ähnelt, umschlossen. Die Fahrtrichtung des Zuges ist hierbei von links nach rechts. Diese Abläufe werden nachfolgend in 1. bis 6. detailliert und in ihrer zeitlichen Abfolge beschrieben:

1. Detektiert eine HOA einen Heißläufer, wird eine HOA-Alarmmeldung generiert. Die HOA-Alarmmeldung wird auf einem Monitor des Fahrdienstleiters angezeigt, in dessen Stellbereich sich das Stellsignal für den detektierten Zug befindet.

2. Nachdem der Fahrdienstleiter die HOA-Alarmmeldung wahrgenommen hat, kontrolliert dieser, ob das in der HOA-Alarmmeldung angegebene Stellsignal für die Zugfahrt des detektierten Zuges Hp 0 zeigt. Wenn das Stellsignal für den betroffenen Zug einen Fahrtbegriff anzeigt, stellt der Fahrdienstleiter das Stellsignal auf Hp 0.
3. Der Fahrdienstleiter stellt eine fernmündliche Verbindung zum Triebfahrzeugführer des detektierten Zuges her und teilt dem Triebfahrzeugführer die HOA-Alarmart, die betroffene Achse und bei einem Heißalarm oder Alarm „Differenz Heiß“ die detektierte Zugseite mit gemäß [RIL 408.0553].
4. Der Triebfahrzeugführer hält den Zug am Halt zeigenden Stellsignal an. Dabei wirkt das in dem Zug aktive Zugbeeinflussungssystem mit. Hierbei kann es sich z. B. um das punktförmig wirkende System PZB 90 oder um die Linienzugbeeinflussung (LZB) handeln.
5. Nach dem Halt des Zuges am Stellsignal verlässt der Triebfahrzeugführer den Führerstand und begibt sich zur detektierten Achse. Dabei zählt er, von der ersten Achse des Zuges am besetzten Führerstand beginnend, die Achsen des Zuges bis zur Nummer der in der HOA-Alarmmeldung angegebenen Achse des Heißläufers. Dort identifiziert der Triebfahrzeugführer die defekte Achse [RIL 408.0553].
6. Der Triebfahrzeugführer setzt das detektierte Fahrzeug aus. Dabei wird der betroffene Zug mit Schrittgeschwindigkeit in den nächsten Bahnhof eingefahren. Das defekte Fahrzeug ist aus dem Zugverband zu entfernen und in ein für die Abstellung HOA-detektierter Fahrzeuge vorgesehenes Gleis zu rangieren [RIL 408.0553].

Das ausgesetzte Fahrzeug verbleibt im Bahnhof und kann dort den notwendigen Reparaturarbeiten unterzogen werden.

3.2 Stellung von PZB-überwachten, HOA-detektierten Zügen und Aussetzung des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik

Im Vorfeld der anschließenden Quantifizierung von Ereignissen und Ereignisketten für die Stellung von PZB-überwachten, HOA-detektierten Zügen und die Aussetzung des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik werden eine Vielzahl von Formelzeichen eingeführt und folgende Festlegungen getroffen:

- Nachfolgend werden Versagenswahrscheinlichkeiten von Ereignissen mit dem Formelzeichen f gekennzeichnet.

- Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit einer Ereigniskette erhält das Formelzeichen F . Das zugehörige Ereignis wird nachfolgend als Gesamtversagensereignis bezeichnet.
- Hochgestellte Indizes beinhalten die Person, die versagt, z. B. den Fahrdienstleiter f^{Fd} oder den Triebfahrzeugführer f^{Tf} .
- Tiefgestellte Indizes bezeichnen die Handlung, bei der die Person versagt. So gibt das Formelzeichen f_{Hp0}^{Tf} das Versagen des Triebfahrzeugführers, der das Signal Hp 0 missachtet, an.
- Beim Versagen technischer Anlagen wird auf eine analoge Nomenklatur zurückgegriffen. Tiefgestellt wird die versagende Anlage benannt (z. B. $f_{HOA\ bei\ Zugfahrt}$). Hochgestellte Indizes entfallen.
- Nähere Erläuterungen werden durch Semikola abgetrennt, wie beispielsweise beim Versagen der Technik von GSM-R auf Strecken mit ETCS-Ausrüstung bzw. in Ballungsräumen $f_{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}$.
- Zur besseren Unterscheidbarkeit wird für jedes Formelzeichen ein individueller, ganzzahlig-fortlaufender Index n eingefügt z. B. $f1_{HOA\ bei\ Zugfahrt}$. Für jedes weitere in dieser Arbeit festgelegte Formelzeichen wird der Index um einen ganzzahligen Wert erhöht, z. B. $f2_{MAS90}$.

Die errechneten bzw. abgeschätzten Wahrscheinlichkeitswerte für die in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten werden übersichtshalber so gerundet, dass nicht mehr als zwei Stellen nach dem Komma auftreten. Eine Ausnahme bilden Wahrscheinlichkeitswerte, die sich aus konkreten Quellen ergeben, wie z. B. aus Lastenheften. In diesem Fall werden die Werte nicht gerundet.

An dieser Stelle sei auf das Formelzeichenverzeichnis verwiesen, das die in dieser Arbeit enthaltenen Formelzeichen auflistet.

3.2.1 Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“

In den Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.6 werden die Ereignisse, die in den Abläufen 1. bis 6. in Abbildung 7 enthalten sind, analysiert und quantifiziert. Dabei stimmen die letzten Zahlen der Kapitelnummern mit denen der Abläufe in Abbildung 7 überein.

Die HOA misst die Temperaturen von sämtlichen Achsen, die diese Anlage passieren. Die Messwerte werden z. B. über das Meldeanlagensystem MAS 90 an dessen Zentrale Steuereinheit (ZSE)

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

geleitet und dort verarbeitet (siehe folgende Abbildung 8). Überschreitet die gemessene Temperatur eine Alarmgrenze, wird eine HOA-Alarmmeldung generiert.

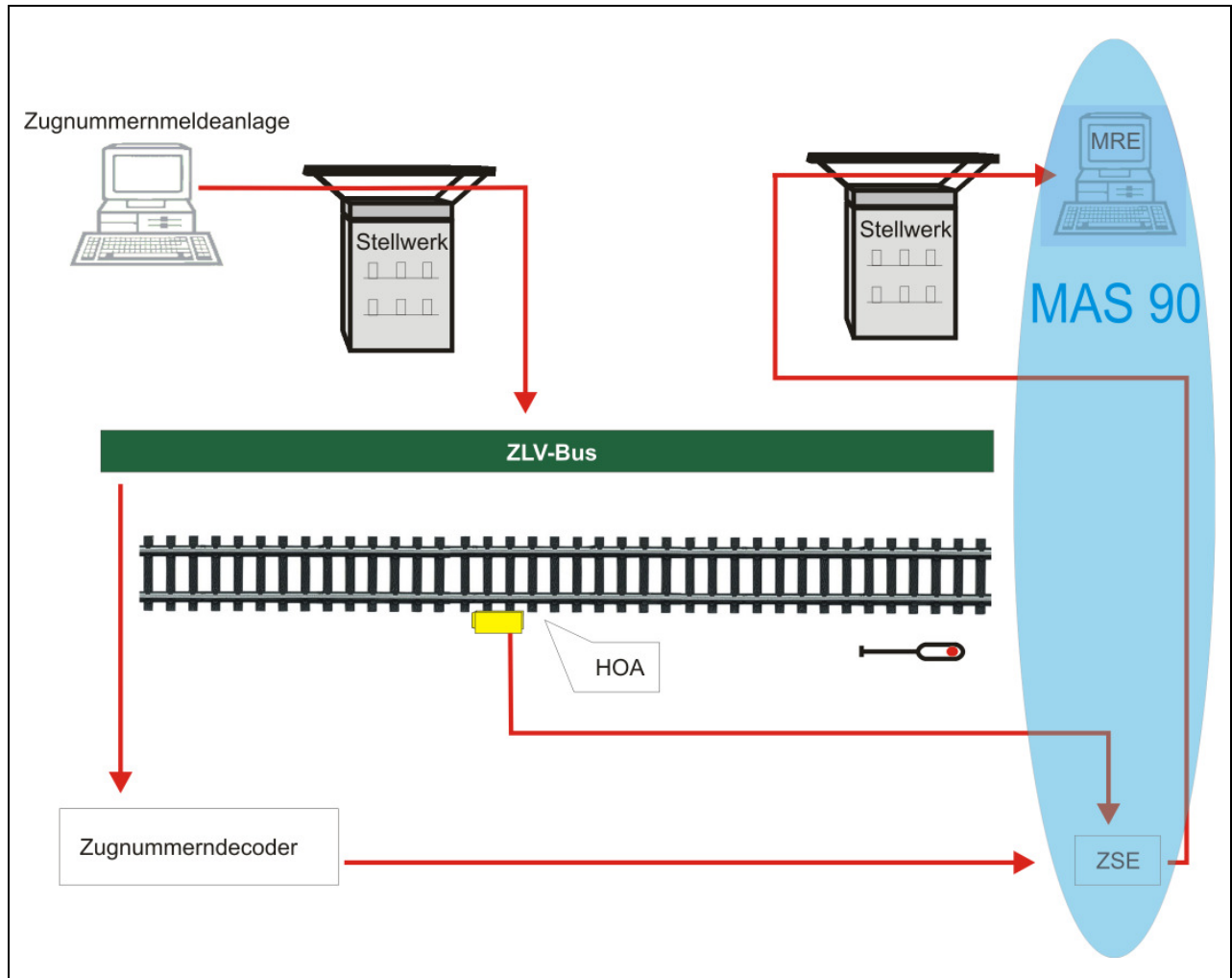


Abbildung 8: Informationsfluss für die HOA-Alarmmeldung bis zur Anzeige auf der MRE

Diese HOA-Alarmmeldung wird mithilfe der Melde- und Registriereinheit (MRE) dem Fahrdienstleiter angezeigt, in dessen Stellbereich sich das Stellsignal der HOA befindet.

Es gibt weitere Anlagenkonfigurationen, bei denen die HOA-Alarmmeldung von der HOA an eine Zentrale Melde- und Registriereinheit (ZMRE) bzw. Zentrale Melde Stelle (ZMS) übertragen wird. Die ZMRE und ZMS sind firmenspezifische Bezeichnungen, erfüllen die gleichen Funktionen und vereinigen sowohl die Funktionalitäten der ZSE als auch der MRE. Diese Anlagenkonfiguration arbeitet jedoch ohne das System MAS 90.

In [RIL 859], Abschnitt 1 Absatz 4 wird hierzu festgelegt: „HOA/FBOA können als autarke Anlagen mit eigener Bedieneinrichtung (zum Beispiel ZMS, ZMRE) oder angebunden an ein übergeordnetes Meldeanlagensystem (zum Beispiel MAS90 oder DBMAS) geplant werden. In der Betriebszentrale BZ ist die Anbindung an ein übergeordnetes Meldeanlagensystem vorzusehen. Für

örtlich besetzte Stellen ist vorzugweise [sic!] die Anbindung an ein übergeordnetes Meldesystem vorzusehen; ist dies nicht möglich, erfolgt die Anbindung an eine eigene autarke Bedieneinrichtung.“

Für Betriebszentralen ist danach zwingend die Anlagenkonfiguration mit dem System MAS 90 vorzusehen. Da in [RIL 859] diese Anlagenkonfiguration auch für örtlich besetzte Stellwerke gegenüber der Anlagenkonfiguration mit einer ZMS bzw. ZMRE der Vorzug einzuräumen ist, wird in dieser Arbeit die Anlagenkonfiguration mit einer ZMRE bzw. ZMS nicht betrachtet. Die Untersuchungen beschränken sich daher auf die Anlagenkonfiguration mit dem System MAS 90, wie in Abbildung 8 dargestellt. Vertiefende Informationen zu Anlagenkonstellationen mit und ohne MAS 90 sind in [DBMAS 2010] enthalten.

Das im vorangegangenen wörtlichen Zitat erwähnte System DBMAS wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da dieses System derzeit noch keine vollumfängliche Zulassung besitzt und somit kaum Erfahrungen zu dessen Verfügbarkeit im Eisenbahnbetrieb vorhanden sind. Untersuchungen zum System DBMAS bleiben daher zukünftigen wissenschaftlichen Arbeiten vorbehalten.

Wird der Stellbereich, in dem sich das Stellsignal der HOA befindet, von einer Betriebszentrale (BZ) aus gesteuert, wird die HOA-Alarmmeldung nicht auf einer MRE angezeigt. Hintergrund der Nichtanwendung der MRE ist, dass diese nur für eine feste Zuordnung zu einem Stellbereich vorgesehen werden kann. Eine dynamische Stellbereichszuordnung, wie sie in der BZ erfolgt, ist mit der MRE nicht realisierbar. Um diese Problematik zu lösen, wurde das „Leitsystem der Betriebsführung zur Fahrwegüberwachung – Betriebliche Gefahrenmeldeanlagen“ (LeiTFÜ-G) entwickelt. Die HOA-Alarminformationen werden von der ZSE über einen Schnittstellenrechner zum LeiTFÜ-G übertragen.

Der Fahrdienstleiter kann anhand der HOA-Alarmmeldung u. a. folgende Daten ersehen:

- Nummer der meldenden HOA,
- die Zugnummer des detektierten Zuges,
- Art des Alarms,
- die Nummer der Alarm auslösenden Achse, gezählt von der Spitze des Zuges,
- das Stellsignal und
- sonstige örtliche Besonderheiten, z. B. notwendige Gleissperrungen während der Identifikation oder des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs.

Ebenfalls in der HOA-Alarmmeldung enthalten ist die Zugseite, an der der Heißläufer detektiert wurde. Dies gilt jedoch nicht bei einem Alarm „Feste Bremse Heiß“. Hier wird keine Zugseite angegeben. Ein Grund hierfür ist in der zugänglichen Literatur nicht angegeben. Es lässt sich ver-

muten, dass man bei Klotz-gebremsten Fahrzeugen davon ausgeht, dass Feste Bremsen auf beide Räder einer Achse wirken.

Um die Zugnummer des detektierten Zuges in der HOA-Alarmmeldung anzeigen zu können, erhält die ZSE vom Zugnummerdecoder die Zugnummer des detektierten Zuges. In [PROG 2012] wird ausgeführt: *„Zur Identifizierung der Züge bei Heißläufermeldungen dient ein Zugnummerndecoder (ZND). Der ZND ‚hört‘ über ein Modem auf dem ZLV-Bus (...) die Zugnummernmeldungen mit.“* In der Dissertation [JUER 2003] wird die Generierung der Zugnummer beschrieben:

„Der Fahrdienstleiter, in dessen Bereich der Zug beginnt, gibt die Zugnummer über die numerische Tastatur in das betreffende Feld ein. Die Zugnummer wird mittels Zugnummernmeldeanlage von einer Optik in die nächste weitergeschaltet. Dazu werden die Fahrstraßeninformationen genutzt um festzustellen, in welche Optik die Zugnummer weitergereicht werden muss. Grundsätzlich erfolgt die Weiterschaltung der Zugnummer bei Haltfall des betreffenden Stellsignals.“

Die Zugnummernmeldeanlagen schalten Zugnummern in den Stellwerken weiter. Für die Kommunikation zwischen den einzelnen Stellwerken ist der Zuglaufverfolgungsbus (ZLV-Bus) vorhanden.“

In dieser Arbeit nicht betrachtet werden die im Netz der DB Netz AG vorhandenen Anlagenkonstellationen, bei denen in der HOA-Alarmmeldung keine Zugnummer des detektierten Zuges angezeigt wird. In diesen Fällen ermittelt der Fahrdienstleiter die Zugnummer des detektierten Zuges aus den im Einzelfall vorhandenen Informationen, z. B. anhand der Zugmeldung oder vom Stellfisch im Relaisstellwerk, wenn die Zugnummernangabe ablesbar ist. Aus Sicht des Autors sind solche Anlagenkonstellationen abzulehnen. Denn beispielsweise im Fall von Störungen oder sonstigen Unregelmäßigkeiten sollte die Konzentration des Fahrdienstleiters bei der sicheren Zugfolge- und Zugreihenfolgeregelung liegen und nicht zusätzlich durch die Ermittlung der Zugnummer eines in dieser Zeit durch eine HOA detektierten Zuges belastet sein. Diese Zusatzbelastung des Fahrdienstleiters ist darüber hinaus unnötig, da die Zugnummernangabe in einer HOA-Alarmmeldung mit der heutigen Technik problemlos realisierbar ist. Die nachträgliche Ermittlung der Zugnummer und damit einhergehende menschliche Fehlermöglichkeiten entfallen somit. Die in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten setzen daher das Vorhandensein der technischen Voraussetzungen für die Zugnummernangabe in der HOA-Alarmmeldung voraus.

Die Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ setzt sich aus vier Ereignissen zusammen, nämlich dem Versagen:

1. der HOA,

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

2. des Systems MAS 90,
3. der Zugnummernbereitstellung und
4. des Fahrdienstleiters, die Zugnummer bei nicht erfolgter Bereitstellung selbstständig zu ermitteln.

Diese vier Ereignisse werden nachfolgend vertiefend beschrieben.

Die Verfügbarkeit wird für HOA in [LAS 2010] mit 0,995 angegeben. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich im Zug ein Heißläufer befindet, ist an dieser Stelle irrelevant. Grund hierfür ist, dass die in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten ohnehin nur auftreten, wenn im Zug ein Heißläufer detektiert wird.

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}}$ der HOA bei Überfahrt eines Zuges mit Heißläufer beträgt danach:

Formel 2

$$f1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}} = 1 - 0,995 = 5 * 10^{-3}.$$

Versagt eine HOA, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass der Fahrdienstleiter keine HOA-Alarmmeldung erhält. Der Heißläufer bleibt unentdeckt. Die Ereigniskette versagt.

Das System MAS 90 ist ein Datenübertragungssystem. Im Lastenheft [LAS 1993] ist angegeben, dass eine Verfügbarkeit des Systems MAS 90 einschließlich der MRE von mindestens 95 % erreicht werden muss.

Damit beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit $f2_{MAS90}$ des Systems MAS 90 bei HOA-Befahrung eines Zuges mit Heißläufer:

Formel 3

$$f2_{MAS90} = 1 - 0,95 = 5 * 10^{-2}.$$

Gegenüber den Forderungen aus [LAS 1993] ist das Netz des Systems MAS 90 heute in einer Ringstruktur aufgebaut. Ist ein Ringabschnitt gestört, kann die Informationsübertragung über die andere Ringhälfte erfolgen. Eine Überwachung der Ringstruktur, die Ausfälle von Teilen des Rings offenbart, wird in [RIL 8591] empfohlen. Die Ringstruktur führt somit zu einer diesbezüglichen Redundanz. Der Kopfknoten der ZSE wird ebenfalls redundant realisiert. Gleiches gilt nach [RIL 8591] für die MRE, bei deren Ausfall die HOA-Alarmmeldung von der ZSE zu einer anderen vorab festgelegten alternativen MRE umgeleitet wird.

Zur Abschätzung der Verfügbarkeit ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Anforderungen aus dem Lastenheft nur um Mindestanforderungen handelt und somit um den schlechtesten Fall. Auf-

grund der redundanten Struktur der entscheidenden Komponenten wird nachfolgend zur positiven Seite von einer Quadrierung der Verfügbarkeit bei real existierenden Anlagen der MAS 90 ausgegangen gegenüber den Mindestforderungen aus dem von 1993 stammenden Lastenheft [LAS 1993]. Die Quadrierung erfolgt durch die Annahme, dass die beiden jeweils redundanten Anlagenkomponenten versagen müssen, damit die gesamte MAS 90-Anlage versagt. Somit liegt eine UND-Verknüpfung vor, sodass die Versagenswahrscheinlichkeiten multipliziert werden. Es gilt nach [NASA 2002] für Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen:

$P(A \cap B) = P(A | B) * P(B)$. Bei Unabhängigkeit von $P(A)$ und $P(B)$ ergibt sich $P(A \cap B) = P(A) * P(B)$.

Für die redundant arbeitenden Komponenten wird in dieser Arbeit keine Abhängigkeit gesehen. Mit anderen Worten: Fällt eine redundante Komponente aus, wird sich die Versagenswahrscheinlichkeit der zweiten Komponente nicht verändern.

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f3_{MAS90-redundant}$ des Systems MAS 90 mit redundanten Komponenten bei HOA-Befahrung eines Zuges errechnet sich danach wie folgt:

Formel 4

$$f3_{MAS90-redundant} = f2_{MAS90} * f2_{MAS90} = (5 * 10^{-2})^2 = 2,5 * 10^{-3}.$$

Versagt das System MAS 90, erhält der Fahrdienstleiter keine HOA-Alarmmeldung. Der Fahrdienstleiter hat in diesem Fall keine Möglichkeit, Kenntnis von dem Erreichen bzw. Überschreiten einer Regelalarmschwelle zu erhalten. Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass die Ereigniskette versagt.

Die Ursache für eine nicht erfolgte Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 kann sowohl durch menschliches als auch durch technisches Versagen verursacht sein. Menschliches Versagen liegt vor, wenn der Fahrdienstleiter, in dessen Stellbereich die Zugfahrt beginnt, die Eingabe der Zugnummer versäumt. Allerdings kann angenommen werden, dass der Fahrdienstleiter das Fehlen der Zugnummer im zugehörigen Anzeigefeld spätestens bei der Weitergabe in das nachfolgende Anzeigefeld bemerkt und den Fehler durch die nachträgliche Eingabe der Zugnummer korrigiert. Dieses menschliche Versagen wird aufgrund der genannten Offenbarung zur positiven Seite in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Eingabe einer falschen Zugnummer durch den Fahrdienstleiter ist hier irrelevant, da diese in der HOA-Alarmmeldung mit übernommen würde und der Fahrdienstleiter den richtigen Zug mit der falschen Zugnummer stellen würde.

Daten mit Aussagen zur Versagenswahrscheinlichkeit $f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}}$ für die Zugnummernbereitstellung für das System MAS 90 durch das Versagen der notwendigen technischen Komponenten liegen nicht vor. Es wird vom Autor in Anlehnung an Formel 2 abgeschätzt:

Formel 5

$$f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}} = 1 - 0,995 = 5 * 10^{-3}.$$

Der Festlegung des Wertes für $f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}}$ liegt zugrunde, dass dieser im Bereich von $f1_{\text{HOA bei Zugfahrt}}$ liegt. Begründbar ist diese Annahme, da es sich sowohl bei der HOA als auch bei den technischen Komponenten der Zugnummernbereitstellung um einkanalige Systeme handelt, für die keine gesonderten Sicherheitsanforderungen festgelegt sind.

Wird in der HOA-Alarmmeldung fehlerhafterweise keine Zugnummer angegeben, stehen dem Fahrdienstleiter Möglichkeiten zur Verfügung, diese selbstständig zu ermitteln. So kann beispielsweise der Fahrdienstleiter eines ESTW bei einem Defekt des Zugnummerndecoders die Zugnummer von der Bedienplatzanzeige ablesen. Bei Relaisstellwerken zeigen meist Tischfelder die Zugnummer an. *„Bei großen Stell- oder Fernsteuerbereichen werden dem Fahrdienstleiter nicht nur die Besetzung von Strecken- und Bahnhofsgleisen angezeigt, vielmehr ist es erforderlich, anzugeben, welcher Zug sich in dem betreffenden Abschnitt befindet. Diese Standortmeldung der Züge geschieht über eine Zugnummernmeldeanlage, von der sog. Zugnummernfelder, die im Gleisbild lagerichtig angeordnet sind, gesteuert werden [SPDRS 1993].“* Eine weitere Quelle ist die Zugmeldung, soweit diese nach [RIL 408.0221] vorgesehen ist.

„Falls aufgrund älterer Sicherungstechnik keine automatischen Zuglaufmeldungen über den ZLV-Bus an die Betriebszentralen gesendet werden können, verwenden die Fahrdienstleiter das System LeiBIT (ergänze: Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung), um Zuglaufinformationen zu übermitteln [JUER 2003].“ *„Eine Funktion von LeiBIT ist eine tabellarische Auflistung der Zugfahrten einer Betriebsstelle, die sortiert nach den Fahrplanzeiten die Zugnummer, die aktuelle Relativlage des Zuges (Abweichung von der planmäßigen Abfahrtszeit), die Gleisnummer sowie den aktuellen Zugstandort und gegebenenfalls die Verspätungsursache enthält [JUER 2003].“*

Es stehen dem Fahrdienstleiter darüber hinaus Unterlagen zur Ermittlung der Zugnummer zur Verfügung, z. B. der Fahrplan für Zugmeldestellen oder bei außerplanmäßig verkehrenden Zügen die Fahrplananordnung. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Zugnummernermittlung bei einer HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummer ist zu quantifizieren. Für die Quantifizierung von menschlichen Handlungen können Ausführungen aus [HINZ 1993] genutzt werden.

Grundsätzlich wird in [Sekundärquelle [HINZ 1993], zitiert darin Primärquelle [EPRI 1984]], zwischen drei menschlichen Verhaltensebenen unterschieden:

- **„Fertigkeits-basierendes Verhalten“** ist dann gegeben, wenn der Mensch die ihm gestellte Aufgabe eindeutig verstanden hat und sie aufgrund seiner Ausbildung mit automatisch ablaufenden, sensomotorischen Reaktionen ausführen kann. Die Zuverlässigkeit des Verhaltens wird hier nur beeinflusst durch die Ausbildungsqualität, die Motivation und die Erfahrung des Menschen.
- **Regel-basierendes Verhalten** ist dann gegeben, wenn der Mensch die ihm gestellte Aufgabe aufgrund festgelegter Symptome einer gelernten Sammlung von Verhaltensregeln der Form 'Wenn-Dann' zuordnen und mit der so gefundenen Regel ausführen kann. Die Zuverlässigkeit des Verhaltens wird hier beeinflusst durch die Qualität der Ausbildung und der dauernden Fortbildung, die Realitätsnähe dieser Bildungsmaßnahmen und die Bereitschaft des Menschen, die vorgegebenen Verhaltensregeln auch Schritt für Schritt genau auszuführen.
- **Wissens-basierendes Verhalten** ist dann gegeben, wenn der Mensch die ihm gestellte Aufgabe aus Mangel an Erfahrung nur lösen kann, indem er seinen Wissensschatz über die Funktionsweise des Systems nutzt, um komplexe oder gar mehrdeutige Informationen auszuwerten, eine Entscheidung aufgrund allgemeiner Ziele zu treffen und dann zu handeln. Die Zuverlässigkeit des Verhaltens wird hier natürlich sehr stark durch den Wissensumfang des Menschen über den Aufbau und die Funktionsweise des Systems und sein Talent, dieses Wissen auch auszunutzen, bestimmt.“

Menschliche Verhaltensebene	günstige Umweltbedingungen			ungünstige Umweltbedingungen		
	Streß durch Unterforderung	optimales Streß-niveau	Streß durch Überforderung	Streß durch Unterforderung	optimales Streß-niveau	Streß durch Überforderung
fertigkeitsbasierend	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
regelbasierend	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
wissensbasierend	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	1,0	$5 \cdot 10^{-1}$	1,0

Tabelle 2: Vorgeschlagene Werte für die menschliche Fehlerrate in verschiedenen Situationen und unter verschiedenen Belastungen in einem sicherheitlichen Mensch-Maschine-System [HINZ 1993]

Tabelle 2 enthält quantitative Werte für die drei menschlichen Verhaltensebenen des fertigungs-, regel- und wissensbasierenden Verhaltens, die in [HINZ 1993] als „menschliche Fehlerraten“ bezeichnet werden. Aus der Definition der menschlichen Fehlerrate in [HINZ 1993]:

$$\text{menschl. Fehlerrate} = \frac{\text{Zahl der beobachteten Fehlhandlungen eines Typs}}{\text{Zahl aller Gelegenheiten für eine Fehlhandlung dieses Typs}}$$

wird deutlich, dass es sich hierbei um eine Wahrscheinlichkeit handelt. Diese wird nachfolgend in dieser Arbeit unter dem Begriff der Versagenswahrscheinlichkeit subsumiert. Hinsichtlich der beiden in Tabelle 2 enthaltenen Kriterien „Umweltbedingungen“ und „Stress“, wird in dieser Arbeit angenommen, dass Fahrdienstleiter und Triebfahrzeugführer in der Regel unter gewohnten und somit für sie günstigen Umweltbedingungen sowie unter einem ihnen bekannten und somit optimalen Stressniveau arbeiten. Wird bei der Quantifizierung von Ereignissen von dieser Annahme abgewichen, wird darauf gesondert eingegangen.

Für den Fahrdienstleiter ist die Zugnummernermittlung aufgrund einer fehlerhaften HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummernangabe ein seltener Ausnahmefall. Verwechselt der Fahrdienstleiter den detektierten Zug mit einem vorausfahrenden bzw. nachfahrenden Zug bzw. mit einem auf dem benachbarten Gleis verkehrenden Zug, wird der Fahrdienstleiter den falschen Zug stellen und die Ereigniskette verfehlt ihr Ziel. Erschwerend kommt hinzu, dass sich der HOA-detektierte Zug zum Zeitpunkt der Anzeige der HOA-Alarmmeldung beim Fahrdienstleiter noch nicht zwangsläufig in dessen Stellbereich befindet. Auch ist die vorgesehene Zeit, die für betriebliche Handlungen z. B. bis zum Stellen des Stellsignals vorgesehen ist, nach [RIL 859] begrenzt auf 30 s bis 45 s. Eine exakt für diese Umstände gültige Regelung für den Fahrdienstleiter für die Zugnummernermittlung ist nicht existent. Die Bereitwilligkeit des Menschen, die vorgegebenen Verhaltensregeln auch Schritt für Schritt genau auszuführen, was einem regelbasierenden Verhalten entsprechen würde, reicht hier nicht aus. Dies belegt, dass der Fahrdienstleiter seinen Wissensumfang über Abläufe im System Eisenbahn nutzen muss, um die HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummernangabe dem zugehörigen HOA-detektierten Zug zuzuordnen. Es ist von einem wissensbasierenden Verhalten auszugehen mit einer Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Zugnummernermittlung bei einer HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummer von $f5^{Fdl}_{\text{Zugnummernermittlung}} = 1 * 10^{-1}$.

$f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}}$ und $f5^{Fdl}_{\text{Zugnummernermittlung}}$ sind durch eine UND-Verknüpfung verbunden. Das heißt, erst wenn beide Ereignisse versagen, steht die korrekte Zugnummer nicht zur Verfügung und die Ereigniskette versagt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f6_{HOA-MRE}$ für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ ergibt sich aus der Summe der

Versagenswahrscheinlichkeiten der HOA, der Zugnummernbereitstellung und -ermittlung sowie der MAS 90 mit redundanten Komponenten einschließlich der MRE/LeiTFÜ-G. Für ODER-Verknüpfungen gilt $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ [NASA 2002].

In [HINZ 1993] wird dargelegt, dass für kleine Werte von Versagenswahrscheinlichkeiten bzw., wie bei [HINZ 1993] genannt, Ausfallwahrscheinlichkeiten im Bereich von $\leq 10^{-2}$ als gute Näherung gelten kann: $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$.

Die Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ wird daher berechnet nach:

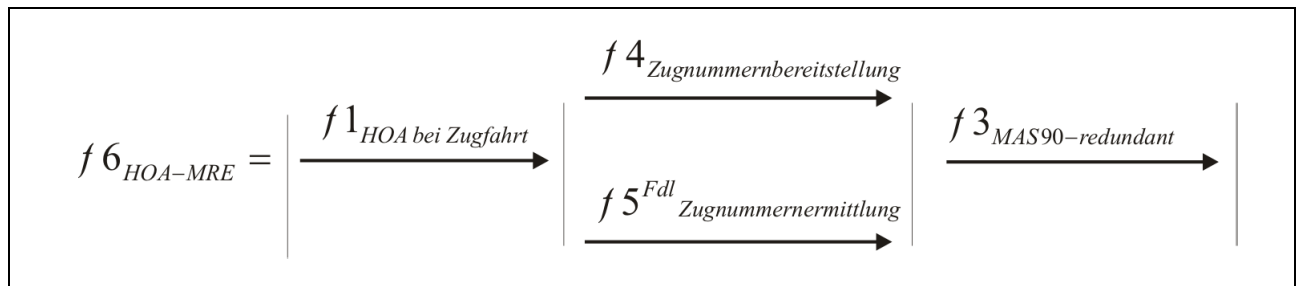


Abbildung 9: Pfeildarstellung der Formel 6

Formel 6

$$\begin{aligned} f6_{HOA-MRE} &= f1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}} + f3_{MAS90-redundant} + (f4_{Zugnummernbereitstellung} * f5^{Fdl}_{Zugnummernermittlung}) \\ &= 5 * 10^{-3} + 2,5 * 10^{-3} + ((5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-1})) \\ &= 8 * 10^{-3} \end{aligned}$$

mit:

- $f6_{HOA-MRE}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“,
- $f1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der HOA bei Überfahrt eines Zuges mit Heißläufer (Formel 2),
- $f3_{MAS90-redundant}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Systems MAS 90 mit redundanten Komponenten bei HOA-Befahrung eines Zuges (Formel 4),
- $f4_{Zugnummernbereitstellung}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 (Formel 5),
- $f5^{Fdl}_{Zugnummernermittlung}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Zugnummernermittlung bei einer HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummer (Kapitel 3.2.1).

Eine Pfeildarstellung der Formel 6 ist in Abbildung 9 enthalten. Pfeildarstellungen zeigen logische Zusammenhänge der in den Formeln enthaltenen Berechnungen. Diese Methodik aus [HINZ 1993] wird nachfolgend erläutert und auch in dieser Arbeit genutzt. Es wird zwischen Reihen- und Parallelsystemen unterschieden. *„Systeme, die so aufgebaut sind, daß bereits der Ausfall eines Systemelementes zum Ausfall des Systems führt, stellen im Sinne der technischen Zuverlässigkeitstheorie Systeme in Reihenordnung dar [HINZ 1993].“* *„Ein solches System läßt sich graphisch durch in Reihe liegende Pfeile darstellen, deren Pfeilspitzen die Ablauffolge und deren Kanten die Funktion eines Systemelementes andeuten [HINZ 1993].“* Die Pfeildarstellung für ein System in Reihenordnung mit drei Elementen ist in Abbildung 10 enthalten.

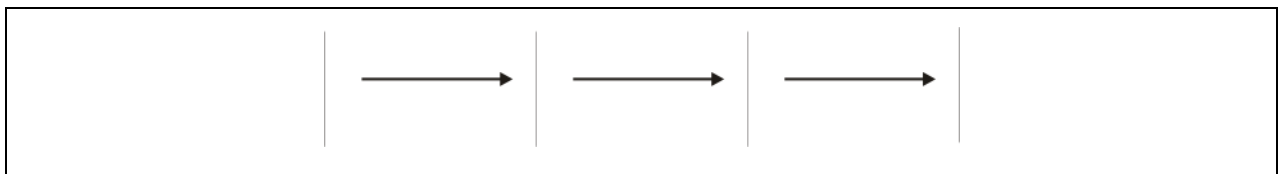


Abbildung 10: Pfeildarstellung eines Systems in Reihenordnung mit drei Elementen [HINZ 1993]

Zum Parallelsystem wird in [HINZ 1993] dargelegt: *„Systeme, die so aufgebaut sind, dass erst der Ausfall aller Systemelemente zum Ausfall des Systems führt, stellen im Sinne der technischen Zuverlässigkeitstheorie Systeme in Parallelanordnung dar. Man sagt dazu auch Systeme mit Redundanz. Ein solches System funktioniert also solange zuverlässig, wie wenigstens noch ein Systemelement zuverlässig arbeitet.“*

„Ein solches System in Parallelanordnung läßt sich graphisch durch parallel liegende Pfeile zwischen 2 Begrenzungsstrichen darstellen, wobei die Pfeilspitzen die Richtung des Ablaufes, die Pfeilkanten die Funktion eines Systemelementes und die beiden Begrenzungsstriche den gemeinsamen Anfangs- und Endzustand andeuten [HINZ 1993].“

„Wenn ein Systemelement ausfällt, fällt dessen Pfeil weg. Solange aber noch ein Systemelement zuverlässig arbeitet, bleibt dessen Pfeil erhalten, die Verbindung zwischen Anfangs- und Endzustand besteht noch, und es wird auch symbolisch deutlich, daß das System noch nicht versagt [HINZ 1993].“ Die Pfeildarstellung für ein System in Parallelanordnung mit vier Elementen ist in Abbildung 11 enthalten.

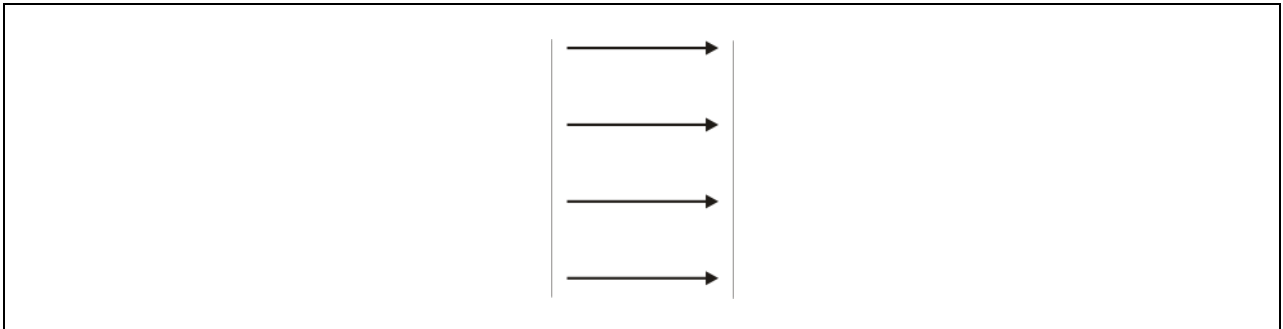


Abbildung 11: Pfeildarstellung eines Systems in Parallelanordnung mit vier Elementen [HINZ 1993]

Im Folgenden wird für komplexere Formeln zur Veranschaulichung die dazugehörige Pfeildarstellung abgebildet (siehe Abbildung 9).

3.2.2 Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung

Eine HOA-Alarmmeldung wird dem Fahrdienstleiter akustisch durch einen Warnton angezeigt. Gleichzeitig erscheint die HOA-Alarmmeldung auf der MRE bzw. auf dem LeiTFÜ-G mit Handlungsanweisungen. Um sicherzustellen, dass das in der HOA-Alarmmeldung genannte Stellsignal für den detektierten Zug auf Halt gestellt bzw. in Haltstellung belassen wird, sind drei Ereignisse erforderlich:

- Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung durch den Fahrdienstleiter mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f7^{Fdl}_{Alarmwahrnehmung}$,
- inhaltliches Erfassen der HOA-Alarmmeldung durch den Fahrdienstleiter mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f8^{Fdl}_{Erfassen\ der\ HOA-Alarmmeldung}$,
- Sicherstellung der Haltstellung des in der HOA-Alarmmeldung vorgegebenen Stellsignals durch den Fahrdienstleiter mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f9^{Fdl}_{Hp0\ nach\ HOA-Alarmmeldung}$.

Für die Bestimmung von $f7^{Fdl}_{Alarmwahrnehmung}$ kann eine fertigkeitsbasierende Handlung angenommen werden, da die HOA-Alarmmeldung akustisch deutlich hörbar angezeigt wird, woraus folgt $f7^{Fdl}_{Alarmwahrnehmung} = 1 \cdot 10^{-3}$.

Nimmt der Fahrdienstleiter die HOA-Alarmmeldung nicht wahr, wird davon ausgegangen, dass der HOA-detektierte Zug nicht gestellt wird. Die Ereigniskette versagt. Dies kann geschehen, wenn der Fahrdienstleiter sich vorübergehend örtlich in einem Raum befindet, wo er die HOA-Alarmmeldung nicht wahrnehmen kann. Auch die Ablenkung aufgrund äußerer Einflüsse, wie Lärm durch Umbauarbeiten im Umfeld seines Arbeitsplatzes oder durch zeitgleiche Gespräche

mit Instandhaltern oder sonstigen im Stellwerk ein und ausgehenden Personalen kann zu einer Nichtwahrnehmung der HOA-Alarmmeldung führen.

Sowohl das Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung als auch die Umsetzung der darin enthaltenen Anweisungen unterliegen eindeutigen, erlernten Regeln, die wiederkehrend geschult und praktiziert werden. Das inhaltliche Erfassen der HOA-Alarmmeldung beinhaltet das verstehende Lesen. Für die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit für das inhaltliche Erfassen der HOA-Alarmmeldung sowie für die Sicherstellung der Haltstellung des Stellsignals werden daher fertigkeitstbasierende Handlungen zugrunde gelegt. Es ergibt sich

$$f8^{Fdl}_{\text{Erfassen der HOA-Alarmmeldung}} = f9^{Fdl}_{\text{Hp0 nach HOA-Alarmmeldung}} = 1 * 10^{-3}.$$

Kommt der Fahrdienstleiter davon ab, den Signalbegriff Hp 0 für das Stellsignal sicherzustellen, wird der HOA-detektierte Zug nicht gestellt. Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass dann die Ereigniskette versagt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung wird errechnet:

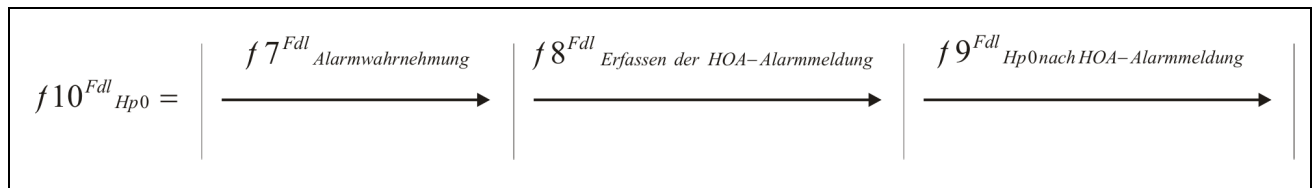


Abbildung 12: Pfeildarstellung der Formel 7

Formel 7

$$\begin{aligned} f10^{Fdl}_{Hp0} &= f7^{Fdl}_{\text{Alarmwahrnehmung}} + f8^{Fdl}_{\text{Erfassen der HOA-Alarmmeldung}} + f9^{Fdl}_{\text{Hp0 nach HOA-Alarmmeldung}} \\ &= 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} \\ &= 3 * 10^{-3} \end{aligned}$$

mit:

- $f10^{Fdl}_{Hp0}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung,
- $f7^{Fdl}_{\text{Alarmwahrnehmung}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f8^{Fdl}_{\text{Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters beim Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),

- $f9^{Fdl}_{Hp0nach HOA-Alarmmeldung}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Sicherstellung der Haltstellung des Stellsignals (Kapitel 3.2.2).

3.2.3 Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite.“

Im Ablauf zu 3. in Abbildung 7 hat der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer Inhalte der HOA-Alarmmeldung mitzuteilen. Die in diesem Zusammenhang auftretenden Ereignisse und die zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeiten werden nachstehend beschrieben. Die daraus resultierende, in der Überschrift genannte Versagenswahrscheinlichkeit wird in der Formel 12, Seite 47 errechnet.

Als erfolgreich wird in dieser Arbeit die Kommunikation bezeichnet, wenn die Informationen aus der HOA-Alarmmeldung, die der Fahrdienstleiter an den Triebfahrzeugführer weiterzugeben hat, vom Triebfahrzeugführer richtig verstanden wurden.

Hierzu müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- a. die Mobilfunktechnik ermöglicht eine Ende-zu-Ende-Verbindung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer,
- b. der Fahrdienstleiter bedient das Mobilfunk-Endgerät korrekt,
- c. der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer den Inhalt der HOA-Alarmmeldung korrekt mit,
- d. der Triebfahrzeugführer erfasst den Inhalt der HOA-Alarmmeldung korrekt.

Die Inhalte der HOA-Alarmmeldung teilt der Fahrdienstleiter fernmündlich dem Triebfahrzeugführer unter Nutzung des Mobilfunksystems „Global System for Mobile Communications – Rail“ (GSM-R) mit. Zum Thema GSM-R gibt es bereits umfangreiche Ausführungen z. B. in [GSMR 2011], [BRAN 2011]. Daher wird in dieser Arbeit nur insoweit auf die GSM-R-Funktionalitäten eingegangen, wie es für das Verständnis dieser Arbeit notwendig ist.

GSM-R wird in dieser Arbeit als Standard für die Kommunikation zum Triebfahrzeugführer angenommen, denn: „Im Bereich der Eisenbahnen des Bundes ist GSM-R bereits nahezu flächendeckend eingeführt [MASC 2012].“. Zudem ist GSM-R Bestandteil der Vereinheitlichungsbestrebungen im europäischen Eisenbahnverkehr als Teil des European Rail Traffic Management Systems (ERTMS).

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

Für die Betrachtungen zu a. wird die Versagenswahrscheinlichkeit für GSM-R aus [LAS 2001] übernommen. Danach muss die Verfügbarkeit von GSM-R in Ballungsräumen sowie auf Strecken mit ETCS 99,921 % betragen, woraus sich für die Versagenswahrscheinlichkeit ergibt:

Formel 8

$$f11_{GSM-R\text{-}Technik; ETCS\text{-}Strecke, Ballungsraum} = 1 - 0,99921 = 7,9 * 10^{-4}.$$

Auf sonstigen Strecken beträgt die Verfügbarkeit 99,531 %. Die Versagenswahrscheinlichkeit beträgt somit:

Formel 9

$$f12_{GSM-R\text{-}Technik; sonstige\ Strecke} = 1 - 0,99531 = 4,69 * 10^{-3}.$$

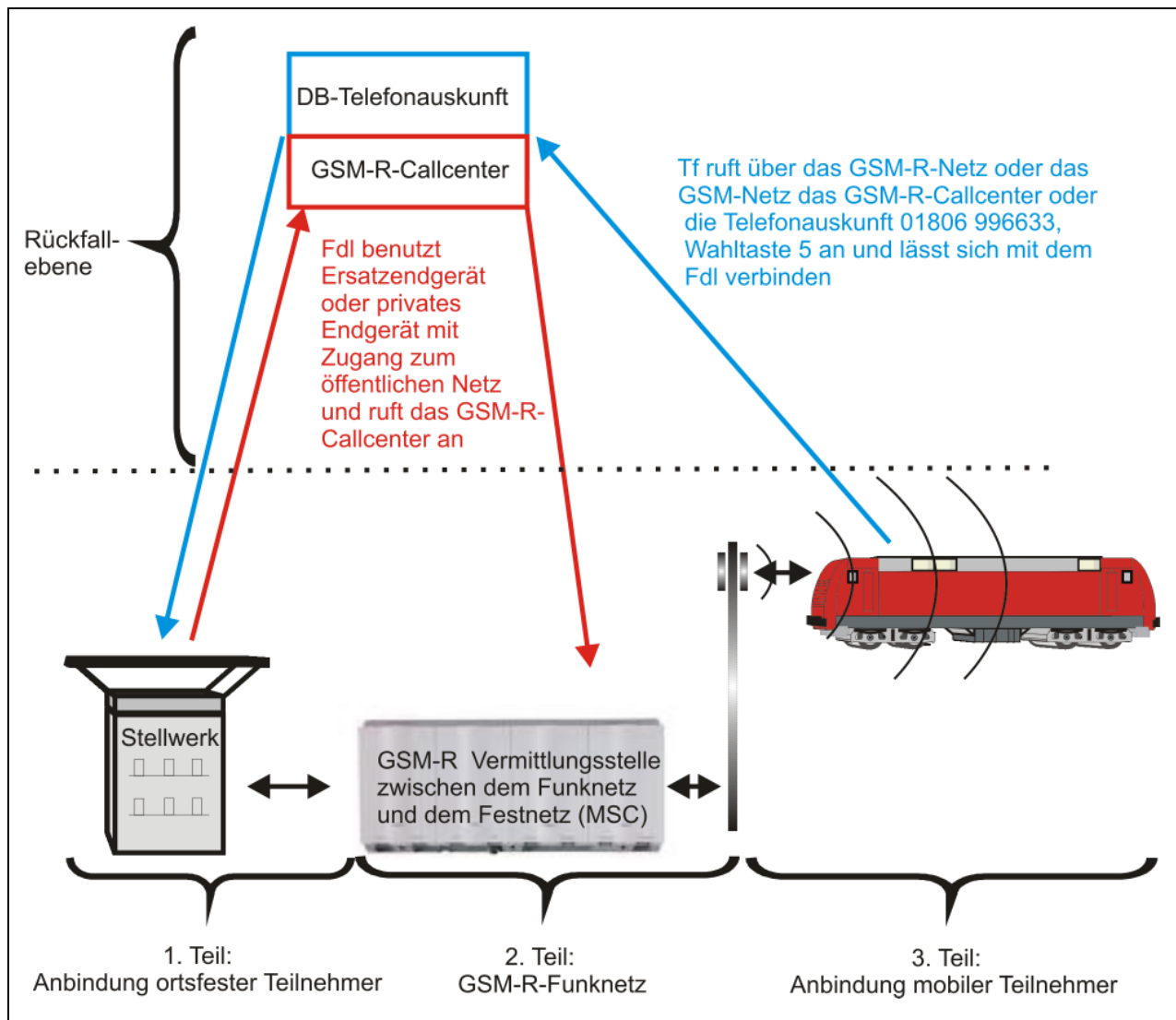


Abbildung 13: Vereinfachte Darstellung einer GSM-R-Funkverbindung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer (schwarze Pfeile) und den Möglichkeiten der Rückfallebene für

den Fahrdienstleiter (rote Pfeile) und für den Triebfahrzeugführer (blaue Pfeile), abgeleitet aus [LAS 2001] und [GSMR 2011]

Aus [LAS 2001] ist zu entnehmen, dass die genannten Verfügbarkeitswerte nur für das GSM-R-Funknetz gelten, welches den Bereich von der Vermittlungsstelle (MSC) bis zur Luftschnittstelle auf der mobilen Seite von GSM-R umfasst (siehe 2. Teil in Abbildung 13) und somit nicht die gesamte Ende-zu-Ende-Verbindung einschließt. Werte für die Ende-zu-Ende-Verbindung stehen nicht zur Verfügung. Darüber hinaus liegen dem Autor keine Informationen vor, wonach solche Werte überhaupt gemessen werden bzw. jemals gemessen wurden. Daher muss eine Abschätzung für die Verfügbarkeit der Ende-zu-Ende-Verbindung bei GSM-R vorgenommen werden.

Neben dem GSM-R-Funknetz (2. Teil) können der 1. Teil und der 3. Teil der Ende-zu-Ende-Verbindung deren Verfügbarkeit beeinflussen. Der 1. Teil umfasst den Bereich vom Endgerät des ortsfesten Teilnehmers, hier des Fahrdienstleiters, bis zur MSC. Ist dieser Bereich gestört, steht dem Fahrdienstleiter ein Ersatztelefon zur Verfügung: *„Auf Betriebsstellen sind in der Regel weitere Telefone aufgestellt, die als Rückfalltelefon dienen, wenn der ortsfeste Teilnehmer wegen einer Störung weder über seine Kurzwahl- noch über seine (Langwahl) GSM-R-Rufnummer erreichbar ist [RIL 481.0205 Z03].“*

Als Bindeglied zwischen dem öffentlichen Netz und dem GSM-R-Funknetz dient das GSM-R-Callcenter, mit dessen Hilfe sich der Fahrdienstleiter mit dem gewünschten mobilen GSM-R-Teilnehmer verbinden lassen kann. Das Callcenter ist auch aus dem öffentlichen Netz erreichbar, sodass sich der Fahrdienstleiter bei Bedarf mithilfe eines privaten Mobilfunkendgerätes mit einem Triebfahrzeugführer in Verbindung setzen kann.

Auch kann sich der Triebfahrzeugführer bei einem Defekt des Fahrdienstleiter-Endgerätes mit dessen Ersatztelefon in Verbindung setzen.

Die Versagenswahrscheinlichkeit, dass aufgrund einer fehlerhaften Anbindung des Endgerätes beim Fahrdienstleiter an das Funknetz kein Gespräch zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer zustande kommt, wird daher als vernachlässigbar gering eingeschätzt.

Sollte das GSM-R-Funknetz trotz der genannten hohen Verfügbarkeit ausfallen, kann der Fahrdienstleiter eine Verbindung zum Triebfahrzeugführer nur herstellen, wenn das GSM-R-Gerät des Triebfahrzeugführers auf den Empfang externer GSM-Netze eingestellt ist. In [BRAN 2011] wird hierzu ausgeführt:

„Der Notruf als Gruppenverbindung durch den Fahrdienstleiter ist nicht mehr möglich und wird durch Einzelverbindungen zu den betroffenen Zugfunkteilnehmern ersetzt. Züge sind über bekannte Ausfälle im GSM-R-Netz nach Ril 481.0205 Abschnitt 9 zu informieren.“ *„Die Züge sind vom ortsfesten GSM-R Endgerät (GeFo) über ihre Zugnummer funktional erreichbar, wenn diese im*

Bedarfsfall in das Roaming umgeschaltet haben oder das Roaming durch die DB Netz AG angeordnet wird.“ „Funktionales Roaming bedeutet, dass die Teilnehmer auch über das Roaming – Netz P-GSM (D) mit ihrer funktionalen GSM-R-Telefonnummer (...) erreichbar sind. Die funktionale Rufnummer ist die von der Endgerätenummer unabhängige Rufnummer des Teilnehmers aufgrund seiner betrieblichen Funktion. Bei ortsfesten Teilnehmern ist diese Nummer feststehend, wie zum Beispiel Fahrdienstleiter, Weichenwärter oder Schrankenwärter.“ „Bei mobilen Teilnehmern, wie zum Beispiel Endgeräte im Führerraum, Zugbegleitpersonal oder Bahnübergangsposten, muss der Teilnehmer bei Arbeitsaufnahme oder Funktionswechsel eine Registrierung seiner jeweiligen Funktion über das Funknetz durchführen (zum Beispiel erstes Triebfahrzeug oder Steuerwagen eines Zuges oder Bahnübergangsposten für Bahnübergang XYZ).“

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass der Triebfahrzeugführer sein Telefon bei kurzfristig auftretenden Ausfällen von GSM-R auf P-GSM (D) umgestellt hat. Da sich jedoch der Triebfahrzeugführer nach [RIL 408.0456] spätestens fünf Minuten nach dem Halt am Stellsignal beim Fahrdienstleiter melden wird, kann angenommen werden, dass der Triebfahrzeugführer spätestens in diesem Zusammenhang erkennt, dass GSM-R nicht zur Verfügung steht. Es wird auf dem Endgerät des Fahrzeugs „kein Netz“ angezeigt [BRAN 2011]. Der Triebfahrzeugführer wird daher sein GSM-R-Endgerät auf P-GSM (D) umstellen, um mit dem Fahrdienstleiter kommunizieren zu können.

Das GSM-R-Endgerät des Triebfahrzeugführers kommuniziert dann im GSM-Netz von T-Mobile [GSMR 2011]. Der Triebfahrzeugführer kann sich vom GSM-R-Callcenter verbinden lassen, dessen Nummer in den Vorbemerkungen zur Zusammenstellung der vorübergehenden Langsamfahrstellen und anderer Besonderheiten abgedruckt ist [BRAN 2011].

Ist das GSM-R-Callcenter ebenfalls nicht erreichbar, kann sich der Triebfahrzeugführer über die zentrale Rufnummernauskunft der Deutschen Bahn AG (Telefonnummer: 01806 99 66 33 – Wahl-taste 5) mit dem Fahrdienstleiter verbinden lassen.

Durch die „Fünf Minuten Regel“ offenbaren sich für den Triebfahrzeugführer weitere mögliche Fehler aus dem 3. Teil des GSM-R-Aufbaus in Abbildung 13, z. B. wenn der Triebfahrzeugführer vergessen hat, das GSM-R-Endgerät einzuschalten, oder wenn das GSM-R-Telefon defekt ist. Da der Triebfahrzeugführer für den 3. Teil des GSM-R-Aufbaus ebenfalls dienstliche und private GSM-Ersatzgeräte nutzen kann, wird auch der diesbezügliche Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit zur positiven Seite als vernachlässigbar gering eingeschätzt. Somit werden die in Formel 8 und Formel 9 für die Ende-zu-Ende-Verbindung genannten Zahlen als maßgebend angesehen. Anhaltspunkte für die Richtigkeit der Annahme für die betriebliche Kommunikation kann auch aus [DBNE 2012] entnommen werden: „Voraussetzung für das europäische Leit- und Sicherungssystem ETCS ist der neue Digitalfunk GSM-R (Global Systems for Mobile Communication-

Rail). Die Deutsche Bahn baut GSM-R auf 24.000 Streckenkilometern des bundesweiten Schienennetzes auf und ersetzt dort den klassischen, analogen Zugfunk. Durch diesen europäischen Standard im Bahnfunk wird die betriebliche Kommunikation weiter verbessert. Neben der hohen Verfügbarkeit von mehr als 99,9 Prozent bietet GSM-R die Möglichkeit zum gezielten Datenaustausch, beispielsweise mit einzelnen Zügen oder Fahrdienstleitern.“

Für die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{13_{GSM-Technik}}$ für das Ereignis: „Die GSM-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung zwischen dem Triebfahrzeugführer und dem Fahrdienstleiter.“ liegen keine Daten vor. Es handelt sich hierbei um die Wahrscheinlichkeit, dass kein GSM-Netz (maßgeblich das T-Mobile-Netz) am Stellsignal zur Verfügung steht. Es muss eine sinnvolle Abschätzung vorgenommen werden. Ursachen für das Versagen können beispielsweise aus der Überlastung des T-Mobile-Netzes an Tagen mit besonders hohem Gesprächsaufkommen, wie zum Jahreswechsel, oder aus Wartungsarbeiten am GSM-Netz resultieren. Zu berücksichtigen ist auch, dass es nach [TEL 2013] in Deutschland noch immer eine Vielzahl von Örtlichkeiten gibt, in denen kein Netz von T-Mobile verfügbar ist. In dieser Arbeit wird dennoch zur positiven Seite angenommen, dass am Stellsignal zu 99 % das GSM-Netz für die fernmündliche Kommunikation zur Verfügung steht. Für die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{13_{GSM-Technik}}$ ergibt sich:

Formel 10

$$f_{13_{GSM-Technik}} = 1 - 0,99 = 1 * 10^{-2}$$

mit:

- $f_{13_{GSM-Technik}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung zwischen dem Triebfahrzeugführer und dem Fahrdienstleiter.“.

Hält ein Zug am Stellsignal, geht die Ereigniskette fehl, wenn über GSM und GSM-R keine Verbindung zwischen dem Triebfahrzeugführer und dem Fahrdienstleiter möglich ist. Denn Fahrdienstleiter arbeiten heute örtlich oftmals nicht mehr in dem ihnen zugeteilten Stellbereich. Dies gilt insbesondere für ESTW, die heute Stand der Technik sind und überwiegend aus der Ferne bedient werden, z. B. aus Betriebszentralen. Darüber hinaus ist in den anerkannten Regeln der Technik nicht vorgesehen, dass ein Fahrdienstleiter seinen Arbeitsplatz verlässt, um dem Triebfahrzeugführer eines am Hauptsignal stehenden Zuges die Inhalte der HOA-Alarmmeldung zu übermitteln. Aus beiden Gründen ist daher anzunehmen, dass in diesem Fall eine Kommunikation zwischen beiden Mitarbeitern erst nach einem zeitlichen Delta erfolgt, nach dem der detektierte Heißläufer bereits soweit abgekühlt ist, dass er vom Triebfahrzeugführer nicht mehr identifiziert werden kann. Die Ereigniskette versagt. Die Versagenswahrscheinlichkeiten $f_{13_{GSM-Technik}}$ und

$f_{11}^{GSM-R\text{-Technik}; ETCS\text{-Strecke, Ballungsraum}}$ bzw. $f_{13}^{GSM\text{-Technik}}$ und $f_{12}^{GSM-R\text{-Technik}; sonstige\ Strecke}$ sind daher durch eine UND-Verknüpfung (siehe nachfolgende Formel 12 bzw. Formel 13) verbunden.

Zu b. stellt im Regelfall der Fahrdienstleiter durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges her mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f_{17}^{Fdl\ GSM-R\text{-Bedienung}}$. Kommt der Fahrdienstleiter von der Bedienung ab, den Triebfahrzeugführer anzurufen, ist davon auszugehen, dass der Fahrdienstleiter die HOA-Alarmmeldung vergessen hat. Selbst wenn der Fahrdienstleiter vorher das Stellsignal auf Hp 0 gestellt bzw. belassen hat und sich der Triebfahrzeugführer nach spätestens fünf Minuten Standzeit vor dem Halt zeigenden Stellsignal beim Fahrdienstleiter gemäß [RIL 408.0456] meldet, ist davon auszugehen, dass der Fahrdienstleiter den HOA-detektierten Zug nach dem Anruf des Triebfahrzeugführers weiterfahren lässt. Die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{17}^{Fdl\ GSM-R\text{-Bedienung}}$ für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ quantifiziert eine fertigkeitsbasierende Handlung, da die Bedienung des GSM-R-Endgerätes einfach, vielfach geübt und somit ohne die Reflexion auf Regeln oder auf besondere Systemkenntnisse erfolgt. Es ergibt sich $f_{17}^{Fdl\ GSM-R\text{-Bedienung}} = 1 * 10^{-3}$.

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers bei der Wahrnehmung des Rufes des Fahrdienstleiters, welche ein Äquivalent zu $f_7^{Fdl\ Alarmwahrnehmung}$ (Kapitel 3.2.2) darstellt, wird in dieser Arbeit zur positiven Seite nicht berücksichtigt. Diese Festlegung kann begründet werden, da sich der Triebfahrzeugführer gemäß [EBO 2012] während der Fahrt des Zuges zwingend im Führerstand befindet und selbst bei anderen Aktivitäten, wie z. B. bei Gesprächen mit weiteren auf dem Führerstand befindlichen Personen, eingehende GSM-R-Rufe hört.

Das Mitteilen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung durch den Fahrdienstleiter gemäß c. an den Triebfahrzeugführer wird für den Fahrdienstleiter als eine Handlung angenommen mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f_{14}^{Fdl\ Information\ an\ Tf,\ Achse\ und\ Zugseite\ nach\ HOA\text{-Alarmmeldung}}$. Zwar teilt der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer mehrere Informationen mit, wie die Nummer der detektierten Achse und unter den genannten Bedingungen die detektierte Zugseite. Jedoch braucht der Fahrdienstleiter die HOA-Alarmmeldung nur vorzulesen, was als ein einzelnes Ereignis zu interpretieren ist.

Teilt der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer die falsche Achse mit, wird der Triebfahrzeugführer den Defekt mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht finden. Dies gilt insbesondere bei längeren Zügen mit nach [RIL 408] bis zu 252 Achsen, bei denen sich der detektierte Heißläufer nicht am Fahrzeug der fehlerhaft genannten Achse und auch nicht an einem der beiden benachbarten Fahrzeuge befindet. Es wird in dieser Arbeit zur positiven Seite angenommen, dass der Triebfahrzeugführer die beiden benachbarten Fahrzeuge nach [RIL 408.0553] kontrolliert und so oder auf dem

Weg zur fehlerhaft mitgeteilten Achse die detektierte Achse anhand des Schadensbildes mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 dennoch ausfindig machen kann.

Komplexer ist die Frage, ob die Ereigniskette fehlgeht, wenn der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer die falsche Zugseite kommuniziert. Nach [RIL 408.0553], Absatz 2, Abschnitt 1 b Nr. 2 ist bei einer Anzeige durch eine Ortungsanlage das geortete Fahrzeug vom Triebfahrzeugführer zu untersuchen. Der Triebfahrzeugführer muss danach das gesamte Fahrzeug untersuchen. Daraus ableitbar wäre, dass die detektierte Zugseite für den Triebfahrzeugführer irrelevant sei bzw. nur eine zusätzliche Information darstellen würde. Jedoch erscheint [RIL 408.0553] hier prozessual nicht vollständig konsistent. Denn darin wird geschrieben, dass der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer vor dem Anhalten des Zuges die Art der Meldung, den betroffenen Radsatz und die betroffene Zugseite mitzuteilen hat. Da dem Fahrdienstleiter bei einem Alarm „Feste Bremse Heiß“ jedoch keine Zugseite angezeigt wird, sondern nur bei einem Heißalarm bzw. einem Alarm „Differenz Heiß“, kann der Fahrdienstleiter im Fall eines Alarms „Feste Bremse Heiß“ der Vorschrift nicht folgen.

Des Weiteren zeigt die Vorgabe der Nennung der Zugseite in [RIL 408.0553], dass diese für die Identifikation der detektierten Achse von sicherheitlicher Bedeutung ist. In dieser Arbeit wird daher mangels anders lautender Daten zur positiven Seite angenommen, dass beim Mitteilen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung durch den Fahrdienstleiter ein fertigkeitsbasierendes Handeln vorliegt unter optimalen Umweltbedingungen mit der niedrigsten nach [HINZ 1993] vorgeschlagenen Versagenswahrscheinlichkeit von $1 * 10^{-3}$. Es wird weiterhin angenommen, dass der Triebfahrzeugführer bei einer falschen HOA-Alarmmeldungsübermittlung durch den Fahrdienstleiter dennoch mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 die detektierte Achse erkennt.

Es ergibt sich somit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden.“ die Versagenswahrscheinlichkeit $f14^{Fdl} \text{ Information an Tf, Achse und Zugseite nach HOA-Alarmmeldung} = (1 * 10^{-3}) * 0,5 = 5 * 10^{-4}$. Es handelt sich hierbei um eine Annahme, die in nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten vertiefend untersucht und ggf. durch dabei gewonnene Daten präzisiert werden könnte.

Der Triebfahrzeugführer hingegen muss in d. jede Information singulär wahrnehmen, da er aus jeder Information weitere Handlungen ableiten muss, wie z. B. das Zählen der Achsen bis zur Nummer der detektierten Achse sowie das Zählen auf der richtigen Zugseite. Daher wird die Wahrnehmung jeder Information der HOA-Alarmmeldung des Triebfahrzeugführers, welche der Fahrdienstleiter vorliest, als einzelnes Ereignis betrachtet mit den Versagenswahrscheinlichkeiten $f15^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse}$ für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Ach-

se richtig.“ und f_{16}^{Tf} Informationswahrnehmung Zugseite für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“, die nachfolgend quantifiziert werden.

Wenn der Triebfahrzeugführer die Nummer der detektierten Achse bzw. die Zugseite nicht richtig erfasst, geht dieser davon aus, dass er alle notwendigen Informationen in korrekter Art und Weise erhalten hat, wird jedoch durch deren Fehlerhaftigkeit fehlgeleitet. Der Triebfahrzeugführer hat an dieser Stelle keine Möglichkeit, die Unkorrektheit der Angaben zu erkennen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass dieser die detektierte Achse anhand des Schadensbildes auf dem Weg zur fehlerhaft genannten Achse erkennt. Dieses Erkennen wird ebenfalls mit der Wahrscheinlichkeit 0,5 angenommen. Somit ergibt sich für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ die Versagenswahrscheinlichkeit f_{15}^{Tf} Informationswahrnehmung Achse = $(1 * 10^{-3}) * 0,5 = 5 * 10^{-4}$.

Die Angabe der Zugseite ist aus einem weiteren Grund von Bedeutung. Nach [RIL 408.0553] darf der Fahrdienstleiter den Zug mit einem Heißalarm bzw. einem Alarm „Differenz Heiß“ in den Bahnhof einlassen, wenn dies nicht in den Örtlichen Richtlinien verboten ist. Befindet sich jedoch am Halteplatz im Bahnhof auf der Seite des Heißläufers eine Bahnsteigkante, kann der Zug dort möglicherweise nicht untersucht werden. Der detektierte Zug muss in diesem Fall erneut bewegt werden, bis dieser einen Platz erreicht hat, der eine Untersuchung des Fahrzeugschadens ermöglicht. Es ist jedoch zur positiven Seite nicht davon auszugehen, dass dieser zeitliche Umstand die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette erhöht, und er wird daher in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Ebenfalls aus einer fertigkeitbasierenden Handlung, die bei deren Versagen mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 zum Versagen der Ereigniskette führt, würde sich für die Versagenswahrscheinlichkeit f_{16}^{Tf} Informationswahrnehmung Zugseite des Ereignisses: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ ein Wert von $5 * 10^{-4}$ ergeben. Da die Zugseite jedoch nur für den Heißalarm und den Alarm „Differenz Heiß“ angegeben wird und nicht bei einem Alarm „Feste Bremse Heiß“, ist deren Verhältnis abzuschätzen. Für das Verhältnis zwischen dem Auftreten des Heißalarms und des Alarms „Differenz Heiß“ einerseits und dem Auftreten des Alarms „Feste Bremse Heiß“ andererseits gibt es in der zitierbaren Literatur keine Angaben. Es wird das Verhältnis angenommen mit:

- einem Drittel Heißalarme und Alarms „Differenz Heiß“ sowie
- zwei Dritteln Alarms „Feste Bremse Heiß“.

Da somit f_{16}^{Tf} Informationswahrnehmung Zugseite nur für ein Drittel aller vorkommenden heißen Alarms von Relevanz ist, ist dies wie folgt zu berücksichtigen:

Formel 11

$$f16^{Tf}_{\text{Informationswahrnehmung Zugseite}} = \frac{1}{3} * (5 * 10^{-4}) = \frac{5}{3} * 10^{-4}$$

mit:

- $f16^{Tf}_{\text{Informationswahrnehmung Zugseite}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“

Nachfolgend ist zu diskutieren, ob die Ereigniskette versagt, wenn der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer die falsche Alarmart mitteilt.

Zwei Fälle sind denkbar:

1. Ein Zug wird mit einem Heißalarm oder einem Alarm „Differenz Heiß“ detektiert. Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer des detektierten Zuges jedoch versehentlich eine Alarmart mit, die auf einem Alarm „Feste Bremse Heiß“ beruht.
2. Ein Zug wurde mit einem Alarm „Feste Bremse Heiß“ detektiert. Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer des detektierten Zuges jedoch versehentlich eine Alarmart mit, die auf einem Heißalarm oder einem Alarm „Differenz Heiß“ basiert.

Für den Fall 1 würde dem Triebfahrzeugführer auffallen, dass er eine Zugseite für den Defekt am Fahrzeug genannt bekäme, obwohl diese bei einem Alarm „Feste Bremse Heiß“ nicht mit angegeben wird. Hier besteht die Möglichkeit der Fehleroffenbarung durch den Triebfahrzeugführer. Kommt es nicht zur Fehleroffenbarung durch den Triebfahrzeugführer, würde dieser sich zur betroffenen Achse auf der genannten Zugseite begeben. Er würde zwar keine „Feste Bremse Heiß“ feststellen. Er steht in diesem Fall jedoch direkt vor der defekten Achse und hätte somit die Möglichkeit, das Bauteil, das den Heißalarm oder den Alarm „Differenz Heiß“ ausgelöst hat, zu erkennen, z. B. durch den Geruch von erwärmten Schmierstoffen im beschädigten Radsatzlager oder bei farblichen Veränderungen am Lagerdeckel.

Im Fall 2 würde der Triebfahrzeugführer keine Information erhalten, auf welcher Zugseite sich der angebliche Heißalarm oder Alarm „Differenz Heiß“ befindet. Da bei derartigen Alarmen jedoch die Zugseite in der HOA-Alarmmeldung mit angegeben wird, kann angenommen werden, dass der Triebfahrzeugführer diese Information beim Fahrdienstleiter erfragt und der Fahrdienstleiter aufgrund dessen seinen Fehler korrigiert. Wenn der Triebfahrzeugführer dies jedoch nicht bemerkt, wird er zwangsläufig den Alarm nicht bestätigen können. Da ein Alarm „Feste Bremse Heiß“ ab einer Temperatur von 400 °C ausgelöst wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Triebfahrzeugführer, der direkt vor dieser Achse steht, die deutlich ausgeprägte Wärmequelle an der Bremse des Fahrzeugs erkennt.

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

Es wird daher für diese Arbeit zur positiven Seite angenommen, dass eine fehlerhafte Mitteilung der Alarmart durch den Fahrdienstleiter an den Triebfahrzeugführer nicht zum Versagen der Ereigniskette führt. Auch ist aus der Praxis kein derartiger Fall bekannt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f18^{Fdl, Tf}$ Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; ETCS–Strecke, Ballungsraum für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf Strecken in Ballungsräumen bzw. Strecken mit ETCS.“, die a. bis d. umfasst, ergibt sich aus:

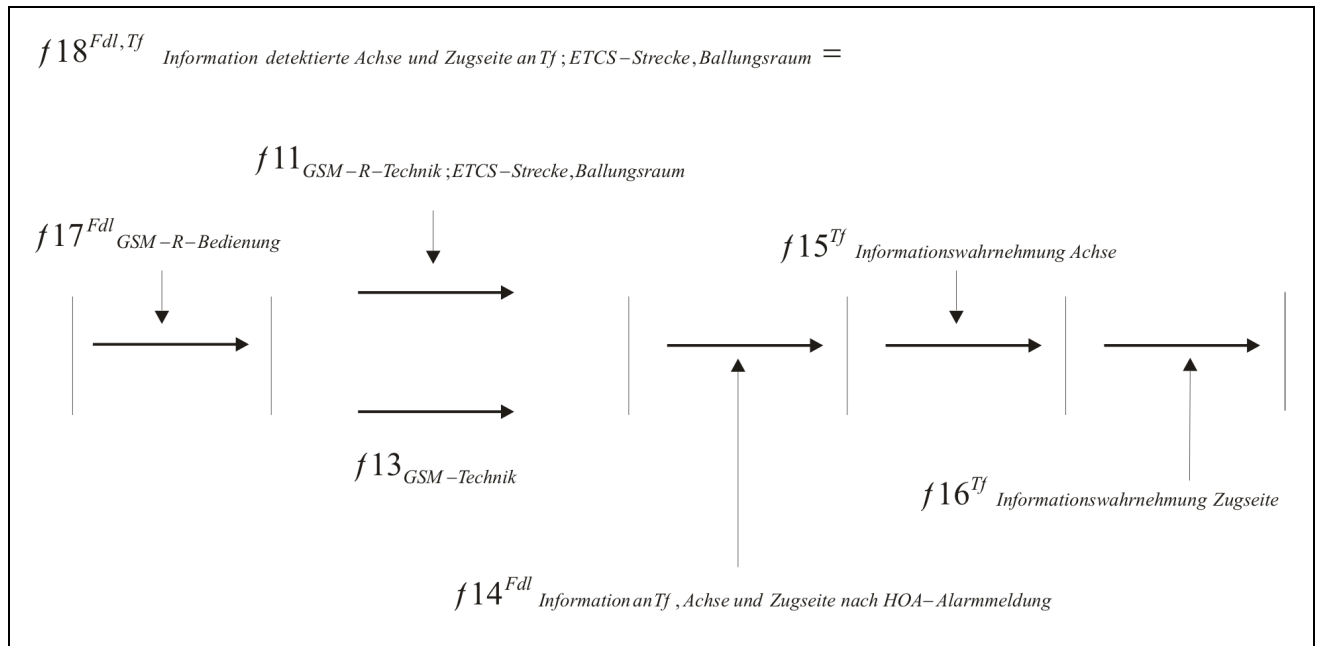


Abbildung 14: Pfeildarstellung der Formel 12

Formel 12

$$\begin{aligned}
 & f18^{Fdl, Tf} \text{ Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; ETCS–Strecke, Ballungsraum} \\
 &= f17^{Fdl} \text{ GSM–R–Bedienung} + (f11^{GSM–R–Technik; ETCS–Strecke, Ballungsraum} * f13^{GSM–Technik}) \\
 &+ f14^{Fdl} \text{ Information an Tf, Achse und Zugseite nach HOA–Alarmmeldung} + f15^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse} \\
 &+ f16^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite} \\
 &= 1 * 10^{-3} + (7,9 * 10^{-4} * (1 * 10^{-2})) + 5 * 10^{-4} + 5 * 10^{-4} + \frac{5}{3} * 10^{-4} \\
 &= 2,18 * 10^{-3}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f18^{Fdl, Tf}$ Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; ETCS–Strecke, Ballungsraum = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich

die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf Strecken in Ballungsräumen bzw. Strecken mit ETCS.“,

- $f17^{Fdl}_{GSM-R-Bedienung}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f11_{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 8),
- $f13_{GSM-Technik}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung zwischen dem Triebfahrzeugführer und dem Fahrdienstleiter.“ (Formel 10),
- $f14^{Fdl}_{Information an Tf, Achse und Zugseite nach HOA-Alarmmeldung}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f15^{Tf}_{Informationswahrnehmung Achse}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f16^{Tf}_{Informationswahrnehmung Zugseite}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (Formel 11).

Die Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf sonstigen Strecken.“ $f19^{Fdl,Tf}_{Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; sonstige Strecke}$ wird berechnet:

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

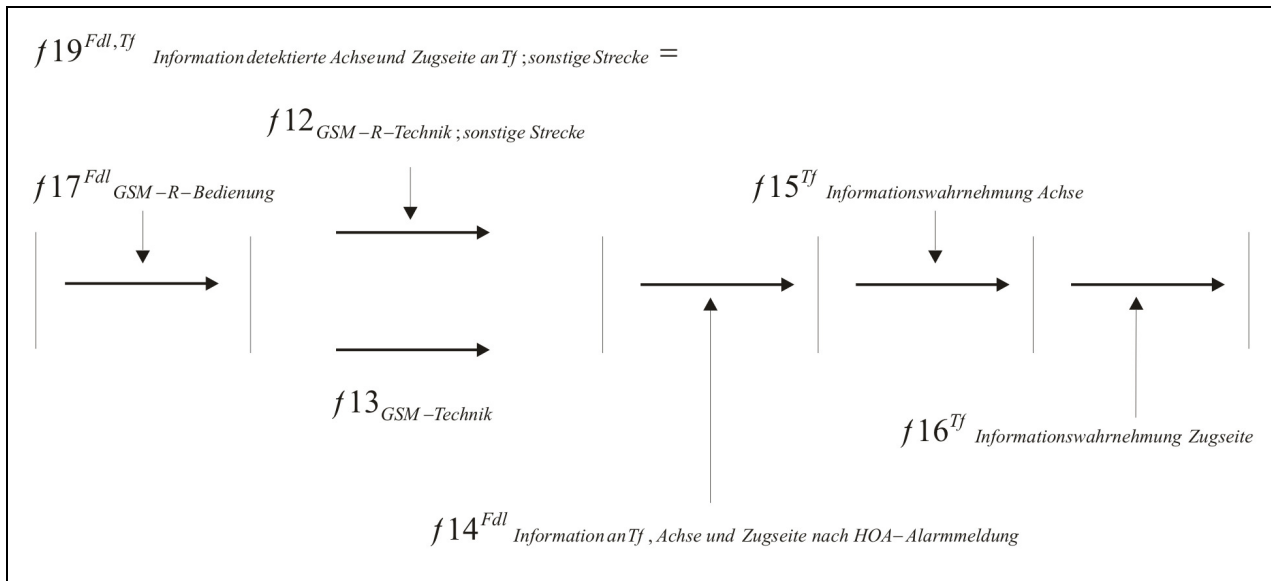


Abbildung 15: Pfeildarstellung der Formel 13

Formel 13

$$\begin{aligned}
 & f19^{Fdl,Tf} \text{ Information detektierte Achse und Zugseite an Tf ; sonstige Strecke} \\
 & = f17^{Fdl} \text{ GSM-R-Bedienung} + (f12^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke} * f13^{GSM-Technik}) \\
 & + f14^{Fdl} \text{ Information an Tf , Achse und Zugseite nach HOA-Alarmmeldung} + f15^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse} \\
 & + f16^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite} \\
 & = 1 * 10^{-3} + (4,69 * 10^{-3} * (1 * 10^{-2})) + 5 * 10^{-4} + 5 * 10^{-4} + \frac{5}{3} * 10^{-4} \\
 & = 2,21 * 10^{-3}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f19^{Fdl,Tf}$ Information detektierte Achse und Zugseite an Tf ; sonstige Strecke = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf sonstigen Strecken.“,
- $f17^{Fdl}$ GSM-R-Bedienung = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f12^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 9),

- $f_{13}^{GSM-Technik}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung zwischen dem Triebfahrzeugführer und dem Fahrdienstleiter.“ (Formel 10),
- f_{14}^{Fdl} *Information an Tf, Achse und Zugseite nach HOA-Alarmmeldung* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden.“ (Kapitel 3.2.3),
- f_{15}^{Tf} *Informationswahrnehmung Achse* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (Kapitel 3.2.3),
- f_{16}^{Tf} *Informationswahrnehmung Zugseite* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (Formel 11).

3.2.4 Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“

Das Anhalten des Zuges mit detektiertem Heißläufer am Stellsignal wird vom Triebfahrzeugführer durchgeführt und sicherungstechnisch durch die PZB 90 überwacht. Die Funktionalitäten der punktförmigen Zugbeeinflussung und speziell der PZB 90 sind bereits in einer Vielzahl von Veröffentlichungen erläutert worden wie z. B. in [JOCH 2004], [RIL 819.1310], [PZB 2001]. Daraus werden nachfolgend nur grundlegende Eigenschaften der PZB 90 genannt, soweit sie für diese Arbeit von Belang sind.

Als Versagen dieses Ereignisses wird in dieser Arbeit nur die unerlaubte Weiterfahrt nach einer Missachtung des Hp 0-zeigenden Stellsignals angesehen. Das in [MASC ETR] ebenfalls für Vorbeifahrten am Halt zeigenden Signal beschriebene Gleiten und Verbremsen verzögert zwar das Halten des Zuges. Jedoch ist davon auszugehen, dass der Triebfahrzeugführer das Halt zeigende Signal erkannt hat, in geringer Entfernung nach dem Halt zeigenden Signal zum Stehen kommt und nach dem Halt nicht unerlaubt weiterfährt. Die Wegdifferenz zwischen dem Stellsignal und dem nachfolgenden Halteplatz, an dem der verbremste bzw. gleitende Zug zum Stehen kommt, wird für die Stellung HOA-detektierter Züge nicht als relevant angesehen.

Zwei Fälle für das Versagen des Ereignisses: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“ sind zu unterscheiden. Das Ereignis versagt im ersten Fall beim Versagen der PZB 90 und bei hinzukommendem Versagen des Triebfahrzeugführers mit der Versagenswahrscheinlichkeit f_{20}^{Tf} *PZB 90-Technik bei Hp 0*.

Für die Versagenswahrscheinlichkeit der induktiven Zugbeeinflussung (Indusi), d. h. des Indusi-Fahrzeuggerätes oder der Indusi-Streckeneinrichtung, die in dieser Arbeit mangels anderweitiger Daten mit der Versagenswahrscheinlichkeit der PZB 90 gleichgesetzt wird, enthält [HINZ 1993] den Wert $1,2 \cdot 10^{-6}$. Für die Missachtung des Signalbildes Hp 0 wird in [MASC ETR] ein Wert von $7,7 \cdot 10^{-6}$ angegeben. Daraus ergibt sich für die UND-Verknüpfung beider Ereignisse folgende Wahrscheinlichkeitsberechnung:

Formel 14

$$\begin{aligned} f 20^{Tf}_{PZB\ 90\text{-}Technik\ bei\ Hp0} &= f 21_{PZB\ 90} * f 22^{Tf}_{Hp0} \\ &= (1,2 \cdot 10^{-6}) * (7,7 \cdot 10^{-6}) \\ &= 9,24 \cdot 10^{-12} \end{aligned}$$

mit:

- $f 20^{Tf}_{PZB\ 90\text{-}Technik\ bei\ Hp0}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält bei nicht funktionstüchtiger PZB 90 am Halt zeigenden Stellsignal an.“,
- $f 21_{PZB\ 90}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der PZB 90, d. h. des PZB-Fahrzeuggerätes oder der PZB – Streckeneinrichtung,
- $f 22^{Tf}_{Hp0}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“.

Im zweiten Fall versagt der Triebfahrzeugführer, jedoch bei funktionsfähiger PZB 90. Folgende Ereignisse müssen versagen, sodass der Zug am Stellsignal mit dem Heißläufer weiterfährt:

- Der Triebfahrzeugführer hält am Halt zeigenden Stellsignal an mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f 22^{Tf}_{Hp0}$. Der Zug kommt daher zumindest durch die 2000 Hz-Beeinflussung zum Halten.
- Der Triebfahrzeugführer folgt den Bestimmungen in [RIL 408.0652], wonach sich dieser nach einer Zwangsbremmung sofort beim Fahrdienstleiter zu melden und dabei mit dem Fahrdienstleiter die Modalitäten für die Weiterfahrt zu klären hat, mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f 23^{Tf}_{Kommunikation\ mit\ Fdl\ nach\ Zwangsbremmung}$.
- Der Triebfahrzeugführer erkennt anhand der PZB-Leuchtmeldeanzeige und dem Warnton, dass es sich um eine Zwangsbremmung nach einer Hp 0-Überfahung handelt, mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f 24^{Tf}_{Missdeutung\ PZB}$.

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

- Weiterhin muss der Triebfahrzeugführer versagen, indem er sich unzulässigerweise aus der 2000 Hz-Beeinflussung nach der Zwangsbremmung befreit zur unberechtigten Fortsetzung der Fahrt. Die entsprechende Versagenswahrscheinlichkeit erhält das Formelzeichen $f 25^{Tf}$ *unzulässige Befreiung für Weiterfahrt*. Die Ursache hierfür kann beispielsweise in der falschen Annahme liegen, dass die Zwangsbremmung aus einer Fehlbedienung oder Fehlfunktion des Fahrzeugs oder der PZB 90-Infrastruktur herrühre.

Die Versagenswahrscheinlichkeiten für $f 23^{Tf}$ *Kommunikation mit Fdl nach Zwangsbremmung*, $f 24^{Tf}$ *Missdeutung PZB* und $f 25^{Tf}$ *unzulässige Befreiung für Weiterfahrt* werden zur positiven Seite mit $1 * 10^{-3}$ angenommen, da sowohl die Einhaltung einer Richtlinie (hier [RIL 408.0652]), das Deuten der PZB-Leuchtmelder sowie des Warntons bei einer Zwangsbremmung, als auch das Wissen um das Verhalten bei einer Zwangsbremmung als erlernt, praktiziert und somit als fertigkeitstbasierend anzunehmen sind.

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers, am Stellsignal mit dem Signalbegriff Hp 0 bei funktionierender PZB 90 zu halten, wird danach wie folgt berechnet:

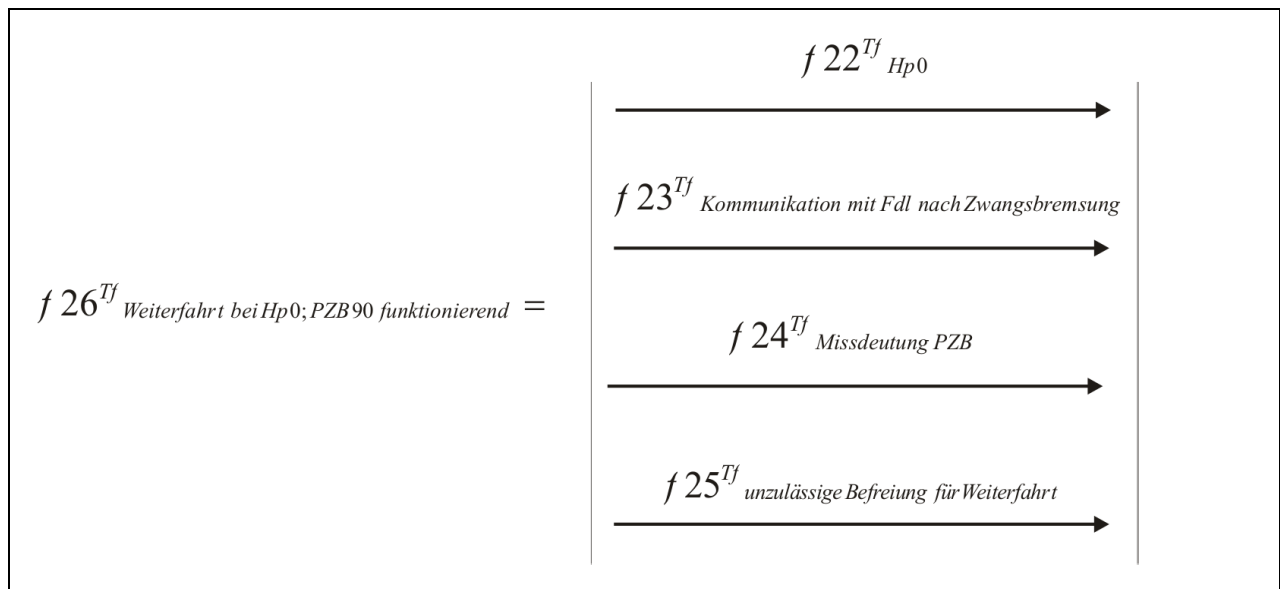


Abbildung 16: Pfeildarstellung der Formel 15

Formel 15

$$\begin{aligned}
 f 26^{Tf} \text{ Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90 funktionierend} &= f 22^{Tf} \text{ Hp0} * f 23^{Tf} \text{ Kommunikation mit Fdl nach Zwangsbremmung} * \\
 & f 24^{Tf} \text{ Missdeutung PZB} * f 25^{Tf} \text{ unzulässige Befreiung für Weiterfahrt} \\
 &= 7,7 * 10^{-6} * (1 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) \\
 &= 7,7 * 10^{-15}
 \end{aligned}$$

mit:

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

- f_{26}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90 funktionierend* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält bei funktionierender PZB 90 am Halt zeigenden Stellsignal an.“,
- f_{22}^{Tf} *Hp0* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“,
- f_{23}^{Tf} *Kommunikation mit Fdl nach Zwangsbremung* = Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers hinsichtlich seiner Pflicht, nach einer Zwangsbremung mit dem Fahrdienstleiter bezüglich der Modalitäten für die Weiterfahrt zu kommunizieren nach [RIL 408.0652],
- f_{24}^{Tf} *Missdeutung PZB* = Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers, die PZB-Leuchtmeldeanzeige und den Warnton als Hinweis auf eine Zwangsbremung nach einer Hp 0-Überfahung zu deuten,
- f_{25}^{Tf} *unzulässige Befreiung für Weiterfahrt* = Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers für dessen Versagen, bei dem er sich unzulässigerweise aus der 2000 Hz-Beeinflussung nach der Zwangsbremung zur Fortsetzung der Fahrt befreit.

Die Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“ ergibt sich aus:

Formel 16

$$\begin{aligned}
 f_{27}^{Tf} \text{ Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90} &= f_{26}^{Tf} \text{ Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90 funktionierend} + f_{20}^{Tf} \text{ PZB 90-Technik bei Hp0} \\
 &= 7,7 * 10^{-15} + 9,24 * 10^{-12} \\
 &= 9,25 * 10^{-12}
 \end{aligned}$$

mit:

- f_{27}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“,
- f_{26}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90 funktionierend* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält bei funktionierender PZB 90 am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 15),
- f_{20}^{Tf} *PZB 90-Technik bei Hp0* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält bei nicht funktionstüchtiger PZB 90 am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 14).

Fährt der Zug an einem Halt zeigenden Stellsignal unberechtigt weiter, wird die Ereigniskette als fehlgeschlagen betrachtet, da von einer konkreten Unfallgefahr auszugehen ist.

3.2.5 Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“

Nachdem der HOA-detektierte Zug am Stellsignal zum Halten gekommen ist, begibt sich der Triebfahrzeugführer zur detektierten Achse und stellt dort die von der HOA detektierte Erwärmung fest. Technische Hilfsmittel stehen dem Triebfahrzeugführer nicht zur Verfügung, sodass die Erwärmung nur durch die Sinneswahrnehmung, wie das Temperaturempfinden der Hand oder durch optische Auffälligkeiten, wie beispielsweise das Glühen von Bestandteilen der Achse, feststellbar ist.

Je nach Tageszeit, Jahreszeit, Wetter, Geländebeschaffenheit und Länge des Zuges stellt die Identifikation der detektierten Achse durch den Triebfahrzeugführer keine gewöhnliche fertigkeitsbasierende Handlung dar. Zwar bewegt sich der Triebfahrzeugführer hierbei in der gewohnten Umwelt, nämlich im Gleisbereich. Es ist jedoch von erhöhtem Stress beim Triebfahrzeugführer auszugehen. Denn die Identifizierung der detektierten Achse stellt einen nicht planbaren, zusätzlichen Aufwand für den Triebfahrzeugführer dar. Weitere Gründe für die Stressentstehung beim Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges können darin begründet sein, dass sich die Fahrt des betroffenen Zuges verzögert. Ebenfalls behindert wird die Fahrt der Züge, die durch die Gleisbesetzung des HOA-detektierten Zuges während der Identifizierung der detektierten Achse bis zur Weiterfahrt bzw. bis zum Aussetzen des beschädigten Fahrzeugs betroffen sind. Eine solche Situation entsteht beispielsweise, wenn auf zweigleisigen Strecken für die nachfahrenden Züge keine Überleitmöglichkeit zur Fahrt auf dem Gegengleis besteht. Auch dieses Wissen kann beim Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges zur Stressentstehung beitragen.

Bei Güterzügen mit bis zu 835 m Gesamtzuglänge [FIS 2012] kann bis zur Identifikation der detektierten Achse unter ungünstigen Umständen ein Zeitraum von mehr als 30 min vergehen. Ursache hierfür ist, dass der Triebfahrzeugführer im Gleisbereich ab der Spitze des Zuges die Achsen zählt und sich bis zur detektierten Achse bewegen muss. In diesem Zeitraum besteht die Möglichkeit, dass sich der Triebfahrzeugführer verzählt oder sich nicht mehr korrekt an die vom Fahrdienstleiter erhaltenen HOA-Alarmmeldungsinhalte erinnert. Es ist daher nach [HINZ 1993] von einer fertigkeitsbasierenden Handlung unter erhöhter Aufmerksamkeit und Stresseinwirkung auszugehen. Die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{28}^{Tf \text{ Identifikation Achse}}$ für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ wäre demnach gemäß Tabelle 2 anzugeben mit $2 \cdot 10^{-3}$. Da der Triebfahrzeugführer jedoch nach [RIL 408.0553] auch die benachbarten Fahrzeuge zu untersuchen hat, wird zur positiven Seite davon ausgegangen, dass der Triebfahrzeugführer mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 dennoch die detektierte Achse identifizieren kann. Somit ergibt sich $f_{28}^{Tf \text{ Identifikation Achse}} = 1 \cdot 10^{-3}$.

Versagt der Triebfahrzeugführer bei der Identifikation der detektierten Heißläuferachse, wird der Triebfahrzeugführer dem Fahrdienstleiter einen Fehllalarm melden und die Fahrt mit dem vom Heißläufer betroffenen Fahrzeug fortsetzen, mit den im Anhang 1 genannten möglichen Folgen. Die Ereigniskette versagt somit.

Dass es sich beim Versagen des Triebfahrzeugführers beim Identifizieren des detektierten Heißläufers keinesfalls um ein rein theoretisches Ereignis handelt, kann aus [EUB BACH] geschlussfolgert werden. Hier wurde am 01.09.2010 am Zug CS 47925 an einer HOA an der 16. Achse, an der linken Zugseite ein Heißläufer detektiert. Der Zug ist am zugehörigen Stellsignal gestellt worden. Der Triebfahrzeugführer konnte jedoch keinen Heißläufer feststellen und setzte die Fahrt mit dem detektierten Fahrzeug fort. Kurze Zeit später entgleiste das detektierte Fahrzeug.

In [EUB BACH] wird folgendes Fazit gezogen: *„Die Auswertung der betrieblichen Abläufe nach der Alarmmeldung der HOA in Bad Breisig lässt den Schluss zu, dass entweder die 16. Achse - links- nicht untersucht wurde oder die Untersuchung der Achse nicht fachgerecht durchgeführt wurde.“*

3.2.6 Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“

Die Aussetzung eines Eisenbahnfahrzeugs erfolgt nach den Regeln in [RIL 408.0553]. Hierzu kann der Triebfahrzeugführer seine erlernten Handlungsfolgen anwenden. Das Aussetzen des Heißläuferfahrzeugs bedeutet jedoch erhebliche Verspätungen und zusätzlichen Aufwand für den Triebfahrzeugführer gegenüber einer nicht durch HOA-Detektion beeinträchtigten Zugfahrt. Dies gilt insbesondere nach einer aufwendigen Identifizierung der detektierten Achse. Für die Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ würde daher eine fertigkeitsbasierende Handlung mit erhöhtem Stress anzunehmen sein. Allerdings kann der Triebfahrzeugführer anhand des bereits identifizierten Schadens kontrollieren, dass dieser das richtige, d. h. das detektierte Fahrzeug ausgesetzt hat. Es liegt daher eine fertigkeitsbasierende Tätigkeit gemäß Tabelle 2 mit $f_{29}^{Tf_{Aussetzen}} = 1 \cdot 10^{-3}$ vor.

Versagt der Triebfahrzeugführer beim Aussetzen des detektierten Fahrzeugs, indem dieser das falsche Fahrzeug aussetzt, wird der Zug die Fahrt mit dem vom Heißläufer betroffenen Fahrzeug fortsetzen. Die Folge ist, dass die Ereigniskette versagt.

3.2.7 Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs nach heutigen anerkannten Regeln der Technik

Aufgrund der unterschiedlichen Festlegungen für die Mindestverfügbarkeiten von GSM-R in [LAS 2001] einerseits für Ballungsräume bzw. für Strecken mit ETCS sowie andererseits für sonstige Strecken, werden für beide Fälle die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten für die derzeit vorgeschriebenen Ereignisketten PZB-überwachter Züge ermittelt.

Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F30_{\text{Stellung; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik wird nach folgender Formel berechnet:

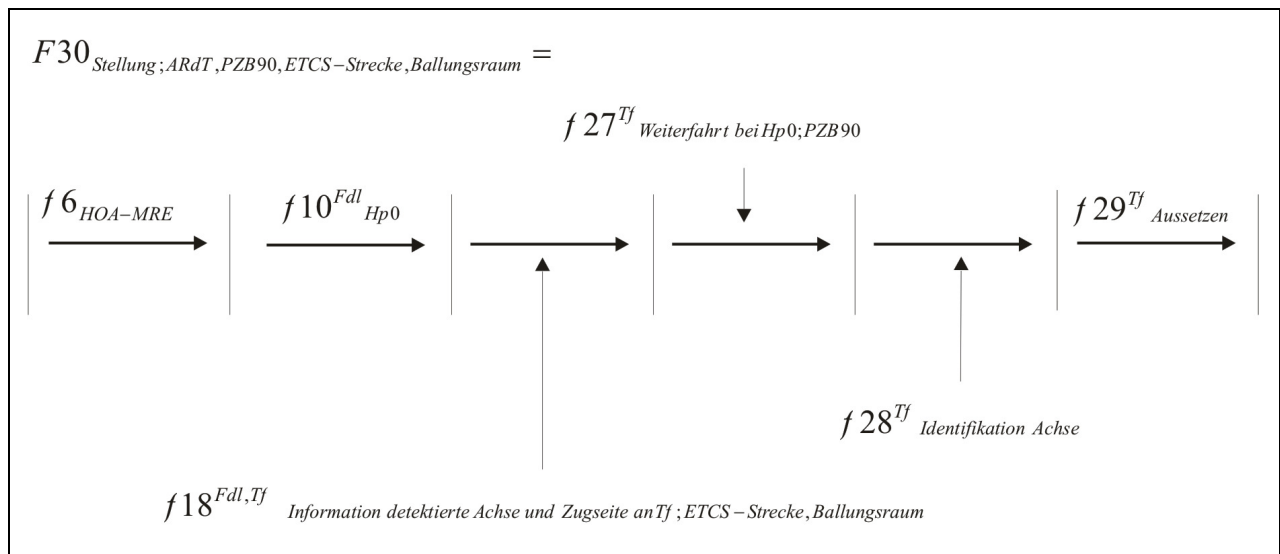


Abbildung 17: Pfeildarstellung der Formel 17

Formel 17

$$\begin{aligned}
 & F30_{\text{Stellung; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
 &= f 6_{\text{HOA-MRE}} + f 10^{\text{Fdl}}_{\text{Hp0}} + f 18^{\text{Fdl, Tf}}_{\text{Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + \\
 & f 27^{\text{Tf}}_{\text{Weiterfahrt bei Hp0; PZB90}} + f 28^{\text{Tf}}_{\text{Identifikation Achse}} + f 29^{\text{Tf}}_{\text{Aussetzen}} \\
 &= 8 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} + 2,18 \cdot 10^{-3} + 9,25 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} \\
 &= 1,52 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

mit:

- $f6_{HOA-MRE}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ (Formel 6),
- $f10^{Fdl}_{Hp0}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung (Formel 7),
- $f18^{Fdl,Tf}_{Information\ detektierte\ Achse\ und\ Zugseite\ an\ Tf;\ ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf Strecken in Ballungsräumen bzw. Strecken mit ETCS.“ (Formel 12),
- $f27^{Tf}_{Weiterfahrt\ bei\ Hp0; PZB90}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 16),
- $f28^{Tf}_{Identifikation\ Achse}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ (Kapitel 3.2.5),
- $f29^{Tf}_{Aussetzen}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F31_{Stellung; ARdT, PZB90, sonstige Strecken}$ der Ereigniskette des Stells HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach heutigen anerkannten Regeln der Technik wird wie folgt ermittelt:

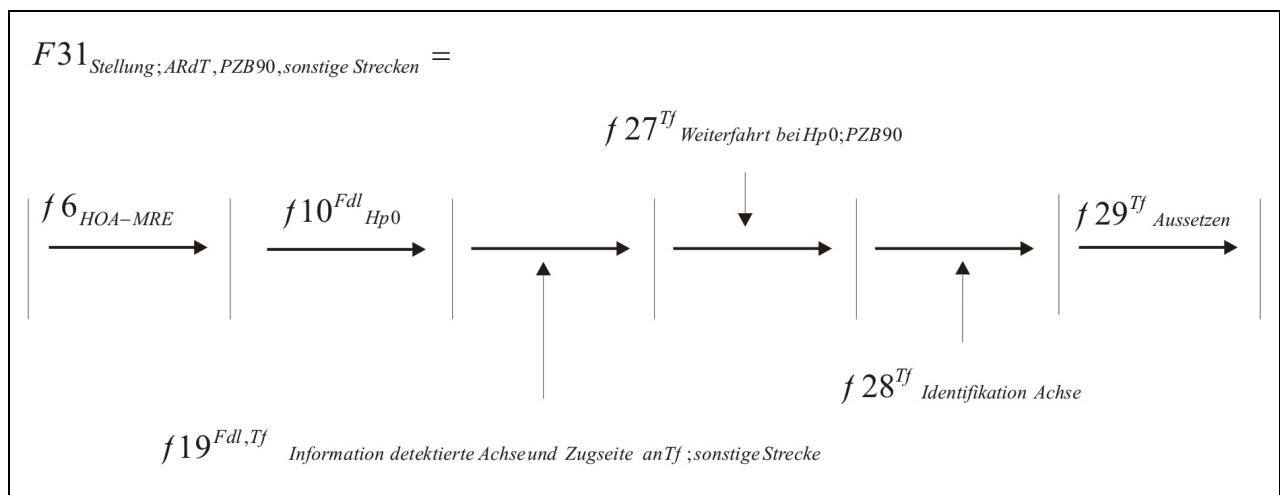


Abbildung 18: Pfeildarstellung der Formel 18

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

Formel 18

$$\begin{aligned}
 & F31_{\text{Stellung ; ARdT , PZB90 , sonstige Strecken}} \\
 &= f6_{\text{HOA-MRE}} + f10^{Fdl}_{\text{Hp0}} + f19^{Fdl, Tf}_{\text{Information detektierte Achse und Zugseite an Tf ; sonstige Strecke}} \\
 &+ f27^{Tf}_{\text{Weiterfahrt bei Hp0 ; PZB 90}} + f28^{Tf}_{\text{Identifikation Achse}} + f29^{Tf}_{\text{Aussetzen}} \\
 &= 8 * 10^{-3} + 3 * 10^{-3} + 2,21 * 10^{-3} + 9,25 * 10^{-12} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} \\
 &= 1,52 * 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f6_{\text{HOA-MRE}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ (Formel 6),
- $f10^{Fdl}_{\text{Hp0}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung (Formel 7),
- $f19^{Fdl, Tf}_{\text{Information detektierte Achse und Zugseite an Tf ; sonstige Strecke}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf sonstigen Strecken.“ (Formel 13),
- $f27^{Tf}_{\text{Weiterfahrt bei Hp0 ; PZB 90}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 16),
- $f28^{Tf}_{\text{Identifikation Achse}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ (Kapitel 3.2.5),
- $f29^{Tf}_{\text{Aussetzen}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

Die errechneten Werte für $F30_{\text{Stellung ; ARdT , PZB90 , ETCS-Strecke , Ballungsraum}}$ und

$F31_{\text{Stellung ; ARdT , PZB90 , sonstige Strecken}}$ sollen nachfolgend diskutiert werden. Die Werte für beide Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten erscheinen auf den ersten Blick sehr groß, da danach die jeweilige Ereigniskette ca. jedes 56. bzw. 57. Mal versagt. Allerdings beschreiben die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten nur, mit welcher Wahrscheinlichkeit die zugehörige Ereigniskette versagt, nicht jedoch die Wahrscheinlichkeit, mit der über das erwärmte Bauteil hinaus ein Schaden, z. B. das Verlassen des sicherungstechnisch gesicherten Regellichtraums oder ein Brandereignis eintritt. Denn selbst wenn die Ereigniskette versagt, gibt es weitere zufällige Möglichkeiten für das Detektieren von Heißläufern. Hierzu zählt z. B. die Detektion durch eine nachfolgende HOA, durch Eingangsuntersuchungen der Fahrzeuge bei deren Übergabe an einen Anschlussbahnbetreiber

oder im Rahmen einer Bremsprobe, bei der der Bremsprobenberechtigte jede Bremse des Zuges nach [RIL 915] prüft. Auch können Heißläufer durch Personen in besetzten Reisezügen erkannt werden, beispielsweise wegen auftretender ungewöhnlicher Fahrgeräusche. In den Kapiteln 3 und 4 werden jedoch nur die dort definierten Ereignisketten betrachtet, da die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten dieser weiteren zufälligen Möglichkeiten im Einzelfall stark variieren dürften und aufgrund fehlender Daten nicht quantifizierbar sind.

3.2.8 Vertiefende Ereigniskettenbetrachtung mithilfe von Fehlerbäumen

Unter Anwendung der Pfeildarstellungen von Gleichungen nach [HINZ 1993] können prozessuale Zusammenhänge zwischen einzelnen Versagensereignissen visualisiert werden, die zu einem Gesamtversagensereignis führen. Wird bei den zugehörigen Berechnungen zusätzlich die Näherung für die ODER-Verknüpfung angewendet, bleibt der Berechnungsaufwand in einem vertretbaren Rahmen. Wenn das Gesamtversagensereignis jedoch von einer größeren Anzahl von Versagensereignissen beeinflusst wird, ist die Übersichtlichkeit nicht mehr gegeben. Dies ist auch dann festzustellen, wenn die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Gesamtversagensereignisses nicht mithilfe einer Gleichung, sondern z. B. bei komplexen Zusammenhängen aus Gründen der Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit schrittweise aus mehreren aufeinander aufbauenden Gleichungen errechnet wird. Um für diese Fälle eine übersichtliche Darstellung der beteiligten Versagensereignisse an einem Gesamtversagensereignis zu realisieren, sind Fehlerbäume das geeignete Instrumentarium.

Fehlerbäume sind bereits mehrfach vollumfassend beschrieben worden, z. B. in [NASA 2002] und [CLIF 2005]. Eine Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten hat sich in den vergangenen Jahren mit der Thematik auseinandergesetzt, wie z. B. [THUM 2004]. Anschließend einführende Erläuterungen zu Fehlerbäumen sind aus [NASA 2002] abgeleitet und dies insofern, wie es für das Verständnis der in dieser Arbeit nachfolgenden Ausführungen erforderlich ist.

Der Fehlerbaum ist kein quantitatives Modell, sondern ein grafisches, qualitatives Modell. Die Quantifizierung erfolgt erst nachträglich mithilfe der Anwendung von logischen Verknüpfungen, wie UND- bzw. ODER-Verknüpfungen. Fehlerbäume bestehen aus Basisereignissen (englisch: basic events). Basisereignisse führen zu Zwischenereignissen (englisch: intermediate events) und zum Gesamtversagensereignis (englisch: top event). Zwischenereignisse und Gesamtversagensereignisse sind Folgen von Basisereignissen, wobei das Gesamtversagensereignis das unerwünschte Ereignis darstellt, dass am Ende der Ereigniskette steht. Basisereignisse beschreiben Mechanismen oder Ursachen, die Einfluss auf das Gesamtversagensereignis haben.

In Kapitel 3.2.7 wurde die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit F_{30} in Formel 17 aus den Versagenswahrscheinlichkeiten:

Stellung; ARdT, PZB90, ETCS – Strecke, Ballungsraum

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

-
- $f6_{HOA-MRE}$,
 - $f10^{Fdl}_{Hp0}$,
 - $f18^{Fdl,Tf}$ *Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; ETCS–Strecke, Ballungsraum*,
 - $f27^{Tf}$ *Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90*,
 - $f28^{Tf}$ *Identifikation Achse* und
 - $f29^{Tf}$ *Aussetzen* ermittelt.

Die ersten vier Versagenswahrscheinlichkeiten gehören zu Zwischenereignissen, die beiden letztgenannten zu Basisereignissen.

Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F30_{Stellung; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ kann auch direkt aus den Versagenswahrscheinlichkeiten von Basisereignissen ohne den Zwischenschritt über die Versagenswahrscheinlichkeiten von Zwischenereignissen errechnet werden. Jedoch würde die Gleichung für $F30_{Stellung; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ dann aus 22 Formelzeichen bestehen, was die bereits erwähnte Unübersichtlichkeit zur Folge hätte. Auch wäre eine übersichtliche Pfeildarstellung nach [HINZ 1993] bei dieser Vorgehensweise ebenfalls nur schwer möglich.

Um alle Basis- und Zwischenereignisse mit den dazugehörigen UND- bzw. ODER-Verknüpfungen hinsichtlich des Einflusses ihrer Versagenswahrscheinlichkeiten auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit in einer Abbildung visualisieren zu können, werden Fehlerbäume für alle in dieser Arbeit entwickelten Ereignisketten erstellt. Mithilfe der darin enthaltenen Quantifizierung sollen die Ergebnisse der Berechnungen, die in dieser Arbeit auf Grundlage der Pfeildarstellung erfolgen, bestätigt werden.

Die Darstellung und die Quantifizierung des Fehlerbaums beinhaltet somit eine zweifache Ergänzung zur Pfeildarstellung nach [HINZ 1993] und der darauf aufbauenden Berechnung. Eine alleinige Verwendung von Fehlerbäumen mit einhergehendem Verzicht auf Berechnungen auf Grundlage der Pfeildarstellung nach [HINZ 1993] wäre ebenfalls nicht zielführend, da in Fehlerbäumen prozessuale Zusammenhänge nur eingeschränkt visualisierbar sind.

In dieser Arbeit wird für die Darstellung von Fehlerbäumen und für die nachträgliche Quantifizierung die Software „FaultTree+“ der Firma Isograph INC verwendet. Wichtige Symbole, die in nachfolgenden Fehlerbäumen der Software „FaultTree+“ genutzt werden sowie in den Fehlerbäumen enthaltene Beschriftungen, werden nachfolgend erläutert. Ein Basisereignis, ein UND-Gatter sowie ein ODER-Gatter sind in Abbildung 19 enthalten.

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

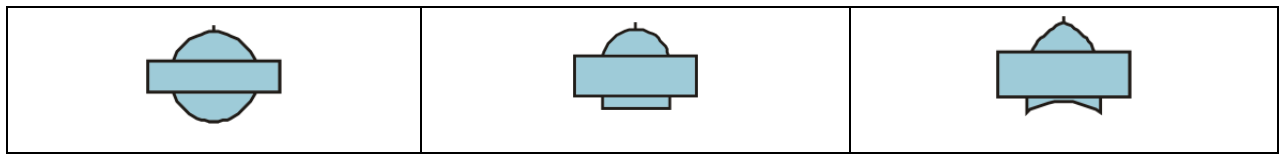


Abbildung 19: Darstellung eines Basisereignisses, eines UND-Gatters und eines ODER-Gatters (von links nach rechts), Symbolik aus [FTP 2013]

Zwischenereignisse und Gesamtversagensereignisse stehen am Ausgang eines Gatters. Die Darstellung des Formelzeichens für die Versagenswahrscheinlichkeit eines Basisereignisses erfolgt im Rechteck über dem Basisereignis. Das Formelzeichen der Versagenswahrscheinlichkeit eines Zwischenereignisses und die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit eines Gesamtversagensereignisses wird im Rechteck oberhalb des zugehörigen Gatters angezeigt (Abbildung 20). Die Software „FaultTree+“ verwendet die Hilfsvariable Q. Der Wert von Q beinhaltet den Wert der Versagens- bzw. der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit.

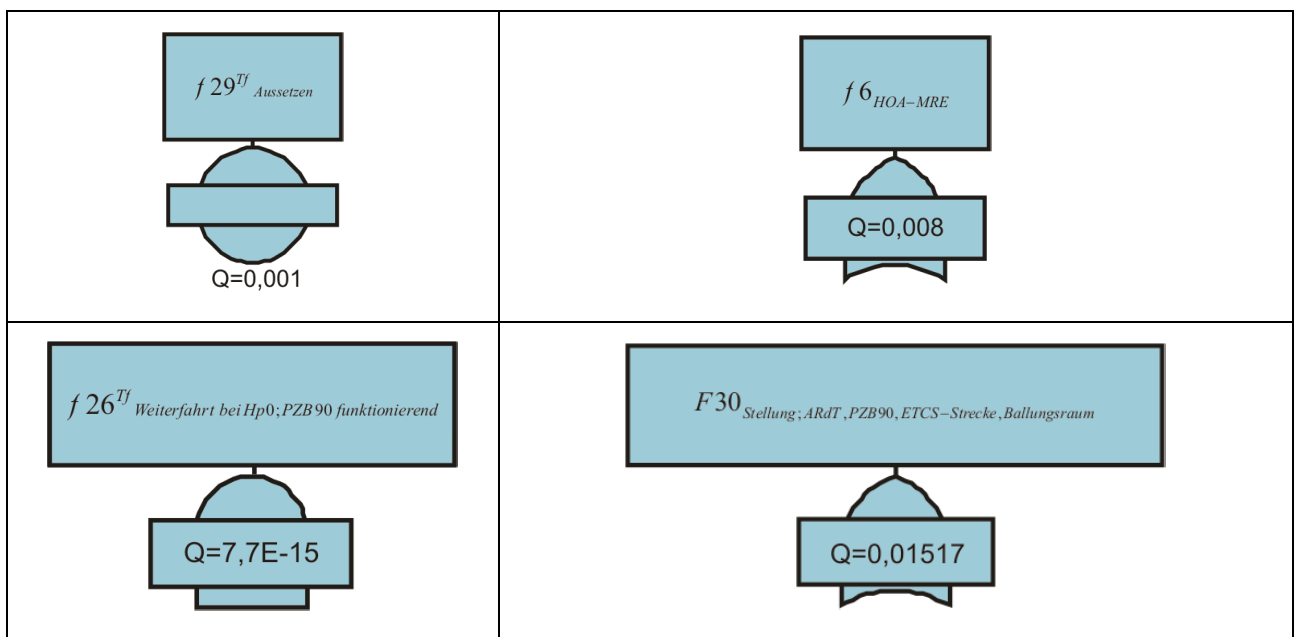


Abbildung 20: Basisereignis, Zwischenereignis als Ergebnis eines ODER-Gatters, Zwischenereignis als Ergebnis eines UND-Gatters, Gesamtversagensereignis einer Ereigniskette (von oben links nach unten rechts) mit Formelzeichen im oberen Rechteck und mit Angabe des zugehörigen Versagens- bzw. Gesamtversagenswahrscheinlichkeitswertes „Q“

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Zwischenereignisses wird aus Versagenswahrscheinlichkeiten von Basisereignissen berechnet, die Einfluss auf das Zwischenereignis haben. Versagenswahrscheinlichkeiten von Zwischenereignissen können jedoch auch zur Berechnung weiterer übergeordneter Zwischenereignisse genutzt werden.

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

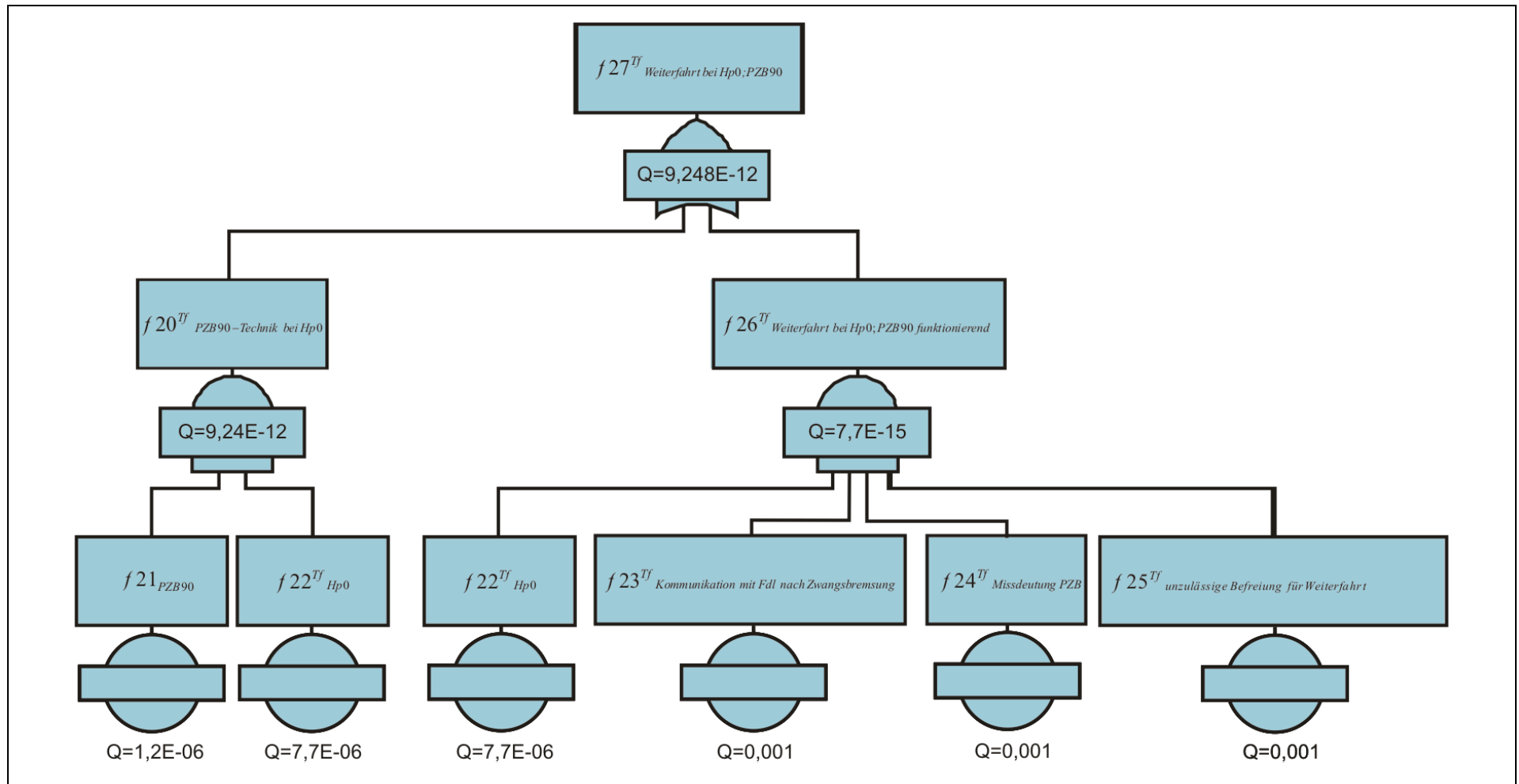


Abbildung 21: Basis- und Zwischenereignisse in einem Fehlerbaum, dargestellt mit der Software „FaultTree+“

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

Zwischenereignisse und Basisereignisse, die keine übergeordneten Zwischenereignisse besitzen, fließen mit ihren Versagenswahrscheinlichkeiten direkt in die Berechnung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit ein. Abbildung 21 zeigt einen Teil eines Fehlerbaums. $f_{21_{PZB90}}$ und $f_{22^{Tf}_{Hp0}}$ sind Versagenswahrscheinlichkeiten von Basisereignissen. Aus $f_{21_{PZB90}}$ und $f_{22^{Tf}_{Hp0}}$ wird, verbunden über ein UND-Gatter, die Versagenswahrscheinlichkeit des Zwischenereignisses $f_{20^{Tf}_{PZB90-Technik\ bei\ Hp0}}$ errechnet. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Zwischenereignisses $f_{26^{Tf}_{Weiterfahrt\ bei\ Hp0; PZB90\ funktionierend}}$ ergibt sich aus der UND-Verknüpfung der Basisereignisse mit den Versagenswahrscheinlichkeiten $f_{22^{Tf}_{Hp0}}$, $f_{23^{Tf}_{Kommunikation\ mit\ Fdl\ nach\ Zwangsbremsung}}$, $f_{24^{Tf}_{Missdeutung\ PZB}}$ und $f_{25^{Tf}_{unzulässige\ Befreiung\ für\ Weiterfahrt}}$. Die Versagenswahrscheinlichkeiten der Zwischenereignisse $f_{20^{Tf}_{PZB90-Technik\ bei\ Hp0}}$ und $f_{26^{Tf}_{Weiterfahrt\ bei\ Hp0; PZB90\ funktionierend}}$ fließen, verbunden über eine ODER-Verknüpfung, in ein weiteres übergeordnetes Zwischenereignis ein und ergeben dessen Versagenswahrscheinlichkeit $f_{27^{Tf}_{Weiterfahrt\ bei\ Hp0; PZB90}}$ (siehe auch Formel 16).

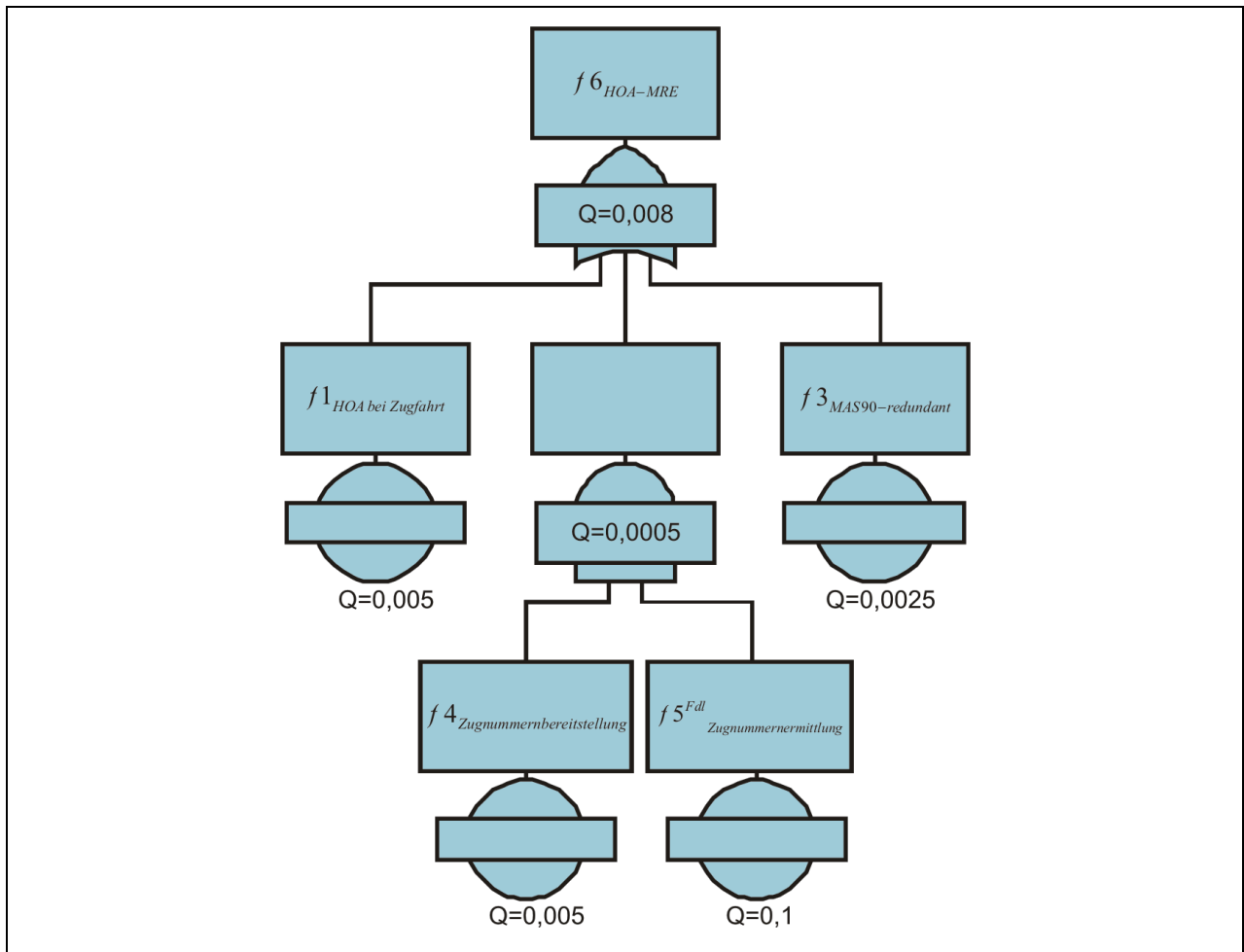


Abbildung 22: Darstellung eines UND-Gatters ohne gleichzeitige Funktion eines Zwischenereignisses

Nicht jeder Ausgang eines Gatters muss zwangsläufig in ein Zwischenereignis münden. Die Ausgänge können mit weiteren Gattern und Basisereignissen in Zwischenereignissen oder in das Gesamtversagensereignis münden. Abbildung 22 zeigt einen solchen Fall im darin dargestellten Ausschnitt eines Fehlerbaums. $f1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}}$, $f3_{MAS90\text{--}redundant}$, $f4_{Zugnummernbereitstellung}$ und $f5^{Fdl}_{Zugnummernermittlung}$ sind Versagenswahrscheinlichkeiten von Basisereignissen. $f4_{Zugnummernbereitstellung}$ und $f5^{Fdl}_{Zugnummernermittlung}$ führen in ein UND-Gatter, das selbst jedoch kein Zwischenereignis mit einer Versagenswahrscheinlichkeit darstellt, sondern dessen Ausgang in ein ODER-Gatter führt wie auch die Basisereignisse mit den Versagenswahrscheinlichkeiten $f1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}}$ und $f3_{MAS90\text{--}redundant}$.

Wie in Kapitel 3.2.1 dargelegt, kann bei Werten $\leq 10^{-2}$ für die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten im Zusammenhang mit der ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ als gute Näherung für die sonst erforderliche Berechnung nach der Formel $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ gelten. Diese Behauptung wird nachfolgend für jede in dieser Arbeit enthaltene Ereigniskette geprüft. Hierzu erfolgt die Quantifizierung der Fehlerbäume für beide Rechenwege.

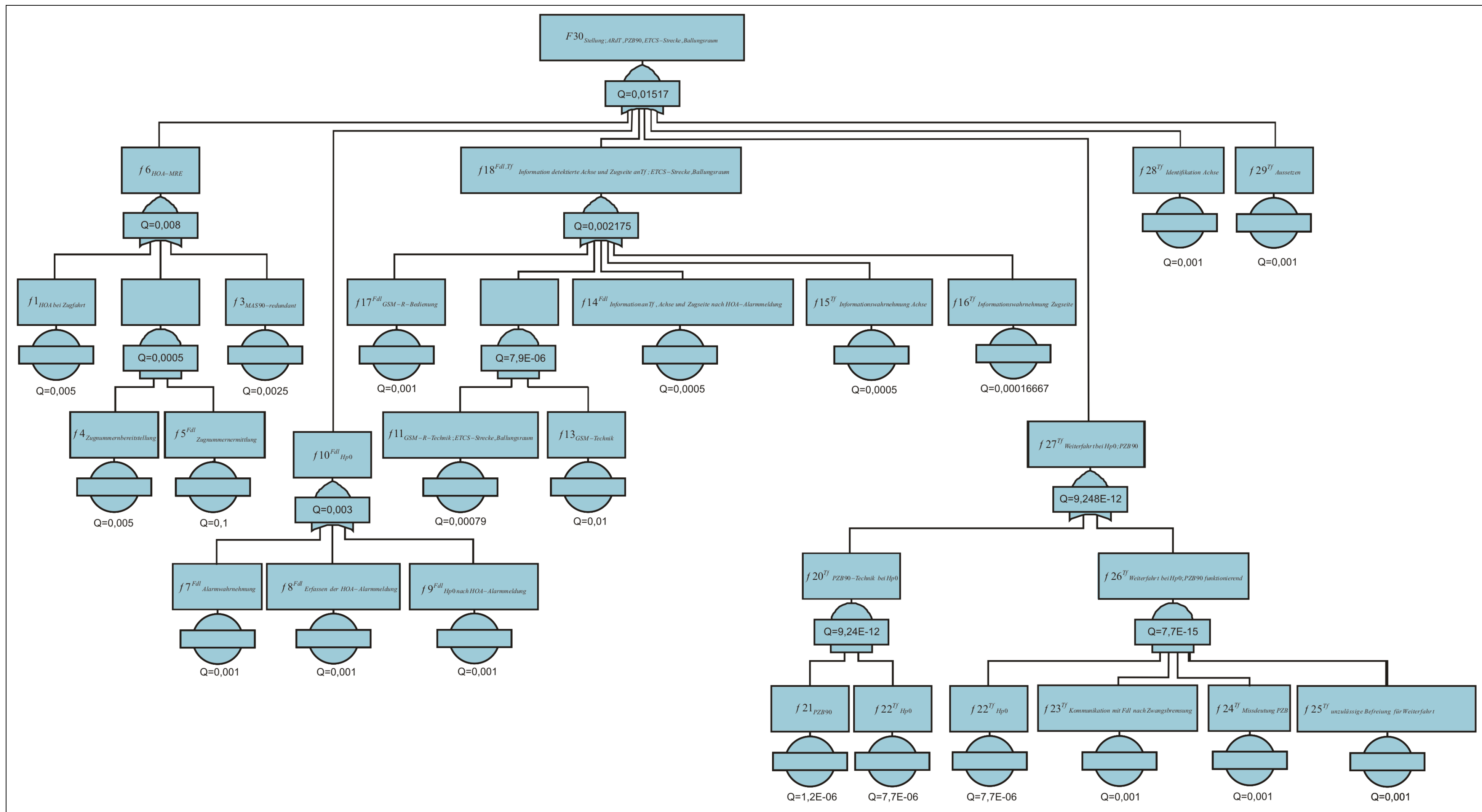


Abbildung 23: Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit F_{30} Stellung; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

Die Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F30_{\text{Stellung;ARdT,PZB90,ETCS-Strecke,Ballungsraum}}$ zeigt Abbildung 23. Für die ODER-Verknüpfungen wurde die Näherung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ verwendet. Der Wert für die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit unter Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ muss aufgrund des zu subtrahierenden Terms geringer ausfallen als der diesbezügliche Wert bei Anwendung der Näherung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$. Die Darstellung des Fehlerbaums mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F30_{\text{Stellung;ARdT,PZB90,ETCS-Strecke,Ballungsraum}}$ unter Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ ist auf der folgenden Seite in Abbildung 24 enthalten.

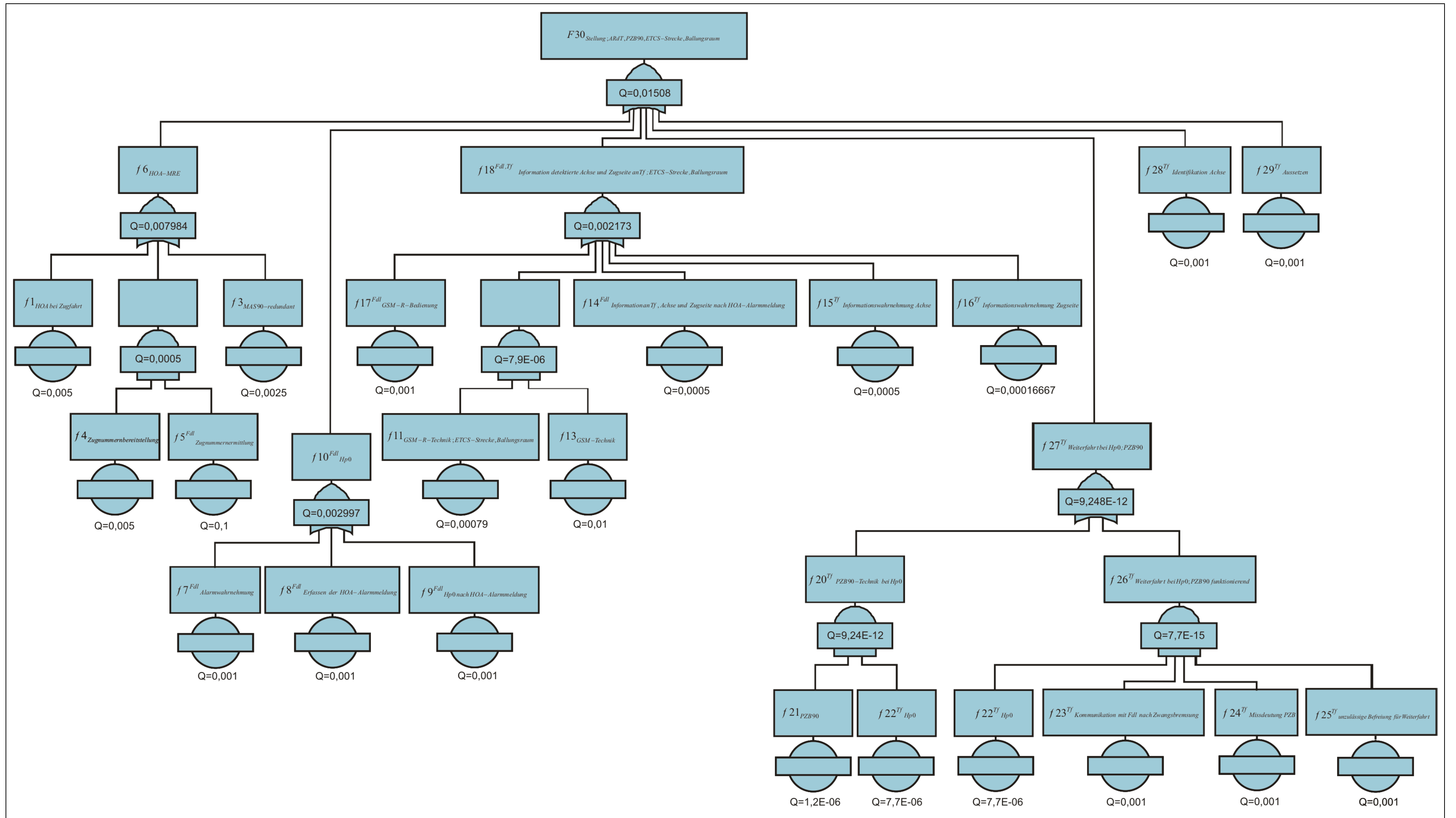


Abbildung 24: Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit

F_{30} Stellung: ARdT, PZB90, ETCS – Strecke, Ballungsraum unter Anwendung der exakten Berechnung der ODER-Verknüpfung mithilfe der Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$

Der Vergleich der Werte für $F30_{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ aus Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigt, dass der Wert bei Anwendung der Näherung um ca. 0,6 % über dem Wert der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung liegt. Die Näherung unterscheidet sich daher nur minimal von dem Wert bei Anwendung der exakten Gleichung. Die diesbezügliche Aussage in [HINZ 1993] kann somit für die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F30_{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ bestätigt werden.

Den Fehlerbaum mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F31_{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, sonstige Strecken}}$ unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ zeigt die nachfolgende Abbildung 25. Die Berechnung in Formel 18 enthält den gleichen Wert. D. h. der Wert $F31_{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, sonstige Strecken}}$ aus Formel 18 wird durch die Fehlerbaumquantifizierung der Software „FaultTree+“ bestätigt. Bei der Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung ergibt sich $F31_{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, sonstige Strecken}} = 0,01512$. Der Wert der Näherung und der exakten Berechnung für $F31_{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, sonstige Strecken}}$ differieren um ca. 0,6 %, sodass sich auch hier bestätigt, dass bei der Anwendung der Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ von einer guten Näherung ausgegangen werden kann.

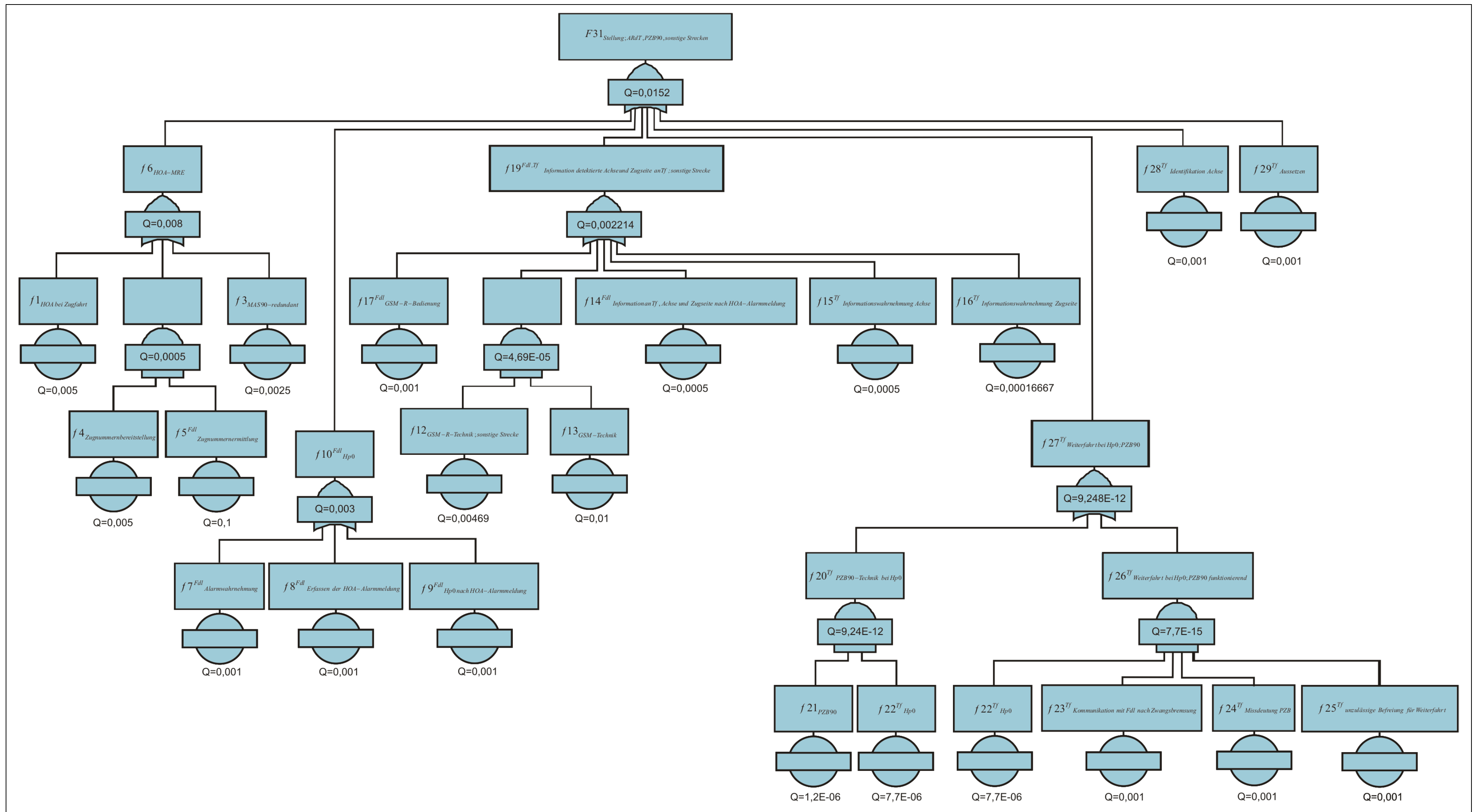


Abbildung 25: Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach heutigen anerkannten Regeln der Technik $F31$ (Stellung; ARdT; PZB90; sonstige Strecken) unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

3.3 Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik

Wurden in Kapitel 3.2 Ereignisketten des Stellens HOA-detektierter, PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs nach heutigen anerkannten Regeln der Technik identifiziert und quantifiziert, erfolgt dies in Kapitel 3.3 für LZB-geführte Züge.

LZB-geführte Züge können im Unterschied zu den in Kapitel 3.2 betrachteten PZB-überwachten Zügen nicht nur an Stellsignalen zum Halten gebracht werden, sondern auch an LZB-Blockkennzeichen (LBK). Zwar benötigt man beim Ausfall der LZB für die Rückfallebene für die Geschwindigkeitsstufe bis 160 km/h immer ein Stellsignal. Für die Geschwindigkeitsstufen über 160 km/h bis 250 km/h und über 250 km/h läge es jedoch nahe, das Stellen von HOA-detektierten, LZB-geführten Zügen am LBK vorzusehen.

Die LZB wurde bereits in einer Vielzahl von Richtlinien und Publikationen ausführlich beschrieben, z. B. in [RIL 483.0201], [RIL 483.0202], [RIL 482.9025], [RIL 819.1320], [LZB 1997], [HCE 1997], [MASC 2012]. Daher werden in dieser Arbeit die LZB-Funktionalitäten aus den genannten Schriftwerken nur insoweit wiedergegeben, wie dies zum Verständnis dieser Arbeit notwendig ist.

Bei LZB-geführten Zügen unterscheidet man das Fahren im Ganzblock- und im Teilblockmodus. Im Ganzblockmodus müssen für LZB-geführte Züge vor deren Einfahrt in voraus liegende, mit Stellsignalen gesicherte Fahrwegabschnitte die gleichen Bedingungen erfüllt sein wie vor dem Zulassen einer PZB 90-überwachten Zugfahrt.

Ist dieser voraus liegende Fahrwegabschnitt durch weitere LBK unterteilt, kann ein LZB-geführter Zug einfahren, auch wenn der Fahrwegabschnitt besetzt ist. Voraussetzung für die Einfahrt in diesen besetzten Fahrwegabschnitt ist das Vorliegen der Bedingungen eines gesicherten Fahrweges mindestens bis zum ersten LBK nach dem Hauptsignal am Beginn des Fahrwegabschnittes. Diese Funktionalität wird Teilblockmodus genannt. In der Regel wird der Ganzblockmodus angewendet. Erst bei der genannten betrieblichen Notwendigkeit wird die Teilblockmodusfunktionalität vonseiten des Stellwerks automatisch aktiviert [HCE 1997].

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

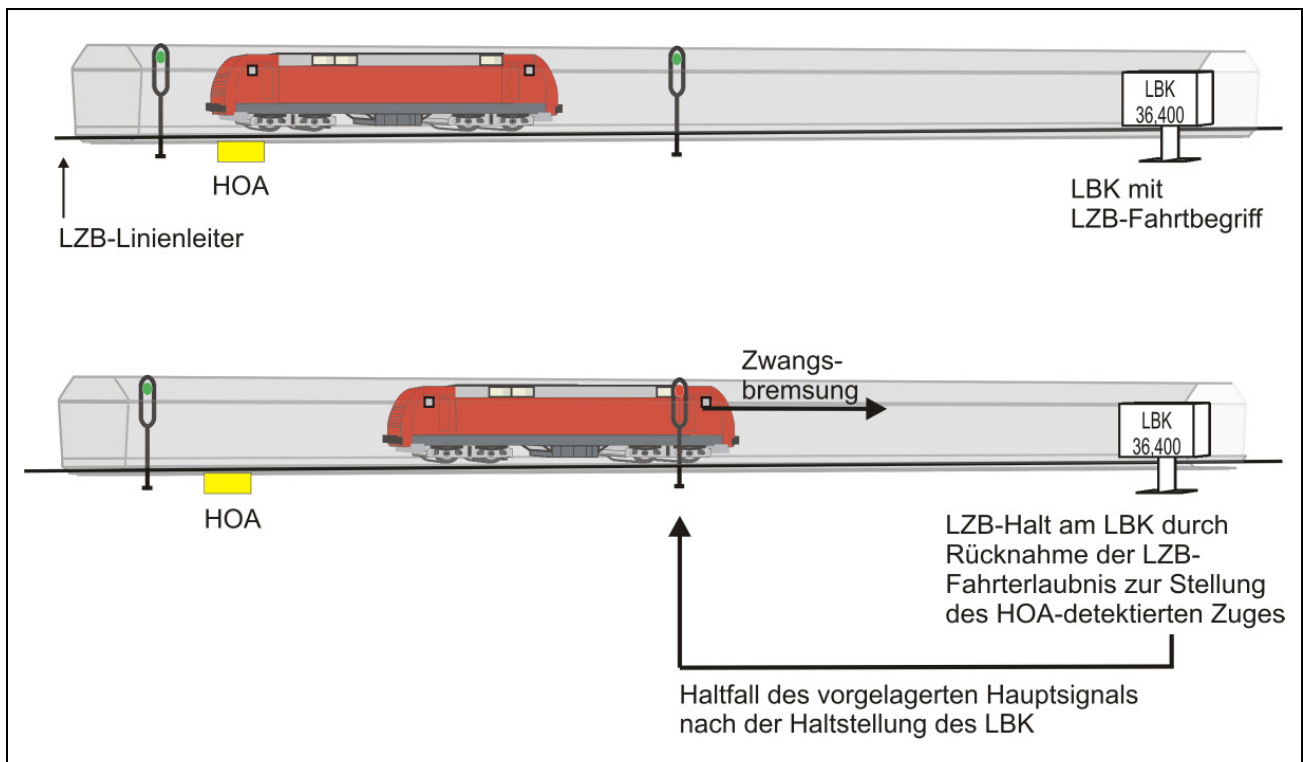


Abbildung 26: Ungewollte Zwangsbremmung nach einer Heißläuferdetektion durch den Haltfall eines zwischen der detektierenden HOA und dem vorgesehenen Stell-LBK gelegenen Hauptsignals, abgeleitet aus [EBA 2002]

Aus [EBA 2002] wird folgender Sachverhalt ableitbar: Wird bei einem im Ganzblockmodus geführten LZB-Zug ein Heißläufer detektiert und befindet sich zwischen der HOA und dem Stell-LBK ein weiteres Hauptsignal, geht bei Haltstellung des Stell-LBK auch das dazwischen liegende Hauptsignal in Haltstellung. Befindet sich der detektierte LZB-Zug bereits innerhalb des Bremswegabstandes zu diesem Hauptsignal, wird ungewollt eine Zwangsbremmung ausgelöst (Abbildung 26). Die bereits beschädigten und durch die HOA detektierten Bauteile des Zuges werden dadurch stark belastet, sodass sich die Entgleisungsgefahr erhöht. Auch kann durch die ungewollte Zwangsbremmung nicht ausgeschlossen werden, dass der zwangsgebremste Zug in einem Tunnel zum Stehen kommt.

Daher ist das Stellen von LZB-geführten Zügen am Stell-LBK aus sicherheitlichen Gründen nicht akzeptabel.

Zwar lässt [RIL 859] das Stellen am LBK unter folgender Einschränkung zu: „Für Züge ($v > 160\text{km/h}$) können LZB Blockkennzeichen (LBK) als Stellort verwendet werden, wenn technisch gewährleistet ist, dass sowohl beim ESTW als auch bei der LZB die Funktionalität ‚Deaktivierung Ganzblocküberwachung‘ aktiviert ist.“

Die Deaktivierung der Ganzblockfunktionalität wirkt sich jedoch bei einem LZB-

Übertragungsausfall nachteilig auf den Betriebsablauf aus. [RIL 408.0652] enthält in Abschnitt 4 folgende Regelung:

„a) Bei einem LZB-Übertragungsausfall im Ganzblockmodus dürfen Sie signalgeführt weiterfahren. Hierzu müssen Sie 2 km mit höchstens 160 km/h gefahren sein und alle Signale am Fahrweg beachtet haben; andernfalls müssen Sie 2 km mit höchstens 40 km/h zur Beobachtung der Signale weiterfahren. Verständigen Sie den Fahrdienstleiter.

b) Bei einem LZB-Übertragungsausfall im Teilblockmodus müssen Sie nach dem Anhalten des Zuges den Fahrdienstleiter verständigen. Sie müssen den Standort der Spitze des Zuges angeben. Hält der Zug vor einem Hauptsignal oder einem Blockkennzeichen, müssen Sie dies als Standort angeben. Andernfalls gilt als Standort das erste Hektometerzeichen, das sich nach dem Anhalten vor der Spitze des Zuges befindet. Um den Standort der Spitze Ihres Zuges festzustellen, dürfen Sie nach dem Anhalten bis vor das nächste Hauptsignal, Blockkennzeichen oder Hektometerzeichen – höchstens jedoch noch 200 m – mit 20 km/h vorziehen. Für die Weiterfahrt als signalgeführter Zug ist ein Befehl 11 erforderlich.“

Bei einem Ausfall der LZB während der Fahrt im Ganzblockmodus muss demnach kein Halt erfolgen und gleichzeitig ist eine zügige Weiterfahrt möglich. Hingegen ist bei einem Ausfall der LZB während der Fahrt im Teilblockmodus zwingend ein Halt des Zuges erforderlich mit anschließender Übermittlung eines Befehls.

Der Nachteil einer Realisierung der Deaktivierungsfunktion des Ganzblockmodus läge in der betrieblichen Behinderung im Fall eines LZB-Übertragungsausfalls bei einer generellen Abschaltung des Ganzblockmodus auf Streckenabschnitten und dies nur aufgrund der potentiellen Stellung von HOA-detektierten Zügen. Daher wird in dieser Arbeit das Stellen von Zügen mit Heißläufern am LBK nicht als sinnvoll angesehen und nicht betrachtet. Auch wurde die Deaktivierungsfunktion des Ganzblockmodus bisher in Deutschland auf keiner Strecke realisiert.

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

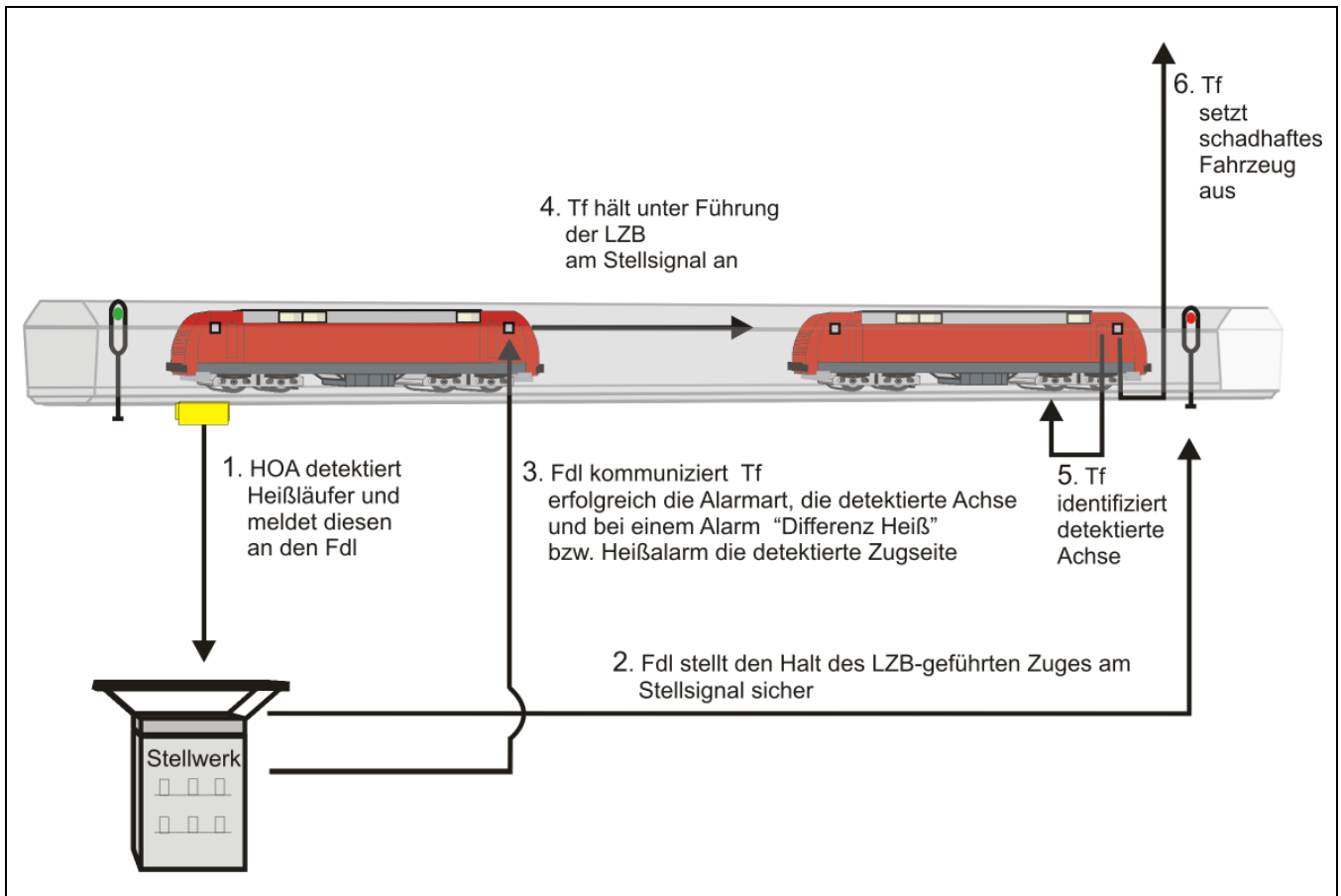


Abbildung 27: Darstellung der Abläufe des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs

Die in Kapitel 3.2 berechnete Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette PZB-überwachter Züge auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik nach Formel 17 sowie die gleichlautende Versagenswahrscheinlichkeit jedoch für sonstige Strecken nach Formel 18 werden nachfolgend hinsichtlich der LZB-Führung angepasst. Die diesbezüglichen Abläufe für LZB-geführte Züge sind in Abbildung 27 enthalten.

Da aus den genannten Gründen keine Stellung am LBK erfolgt, wird davon ausgegangen, dass der HOA-detektierte, LZB-geführte Zug am Stellsignal gestellt wird. Die Formel zur Berechnung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik $F_{32}^{\text{Stellung; ARdT, LZB-Führung, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ wird aus der Formel 17 hergeleitet.

Folgende Substitutionen sind dafür notwendig. Die Versagenswahrscheinlichkeit f_{27}^{Tf} Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90 aus Formel 17 für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“ ist zu substituieren durch die

Versagenswahrscheinlichkeit f_{33}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0;LZB* des Ereignisses: „Der Triebfahrzeugführer hält unter Führung der LZB am Stellsignal an.“. Der Wert f_{33}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0;LZB* muss nachfolgend abgeschätzt werden, da diesbezüglich keine Daten vorliegen.

Ein Verbremsen oder Gleiten eines Zuges mit Überfahrung des Stellsignals wird wie in Kapitel 3.2.4 auch für LZB-geführte Züge nicht als relevant angesehen hinsichtlich des dort beschriebenen Überfahrens des Hp 0-zeigenden Stellsignals. Auch der Ausfall der LZB-Führung ist hier nicht zu berücksichtigen, weil in dem Fall die PZB-Überwachung als Rückfallebene greift. Dies gilt derzeit grundsätzlich, da auf allen LZB-Strecken auch eine PZB-Ausrüstung vorhanden ist.

In der Literatur ist kein Fall vermerkt, in dem ein LZB-geführter Zug an einem LZB-Halt mit einem LZB-Fahrbehl unberechtigt weitergeführt wurde. Daraus folgend wird abgeschätzt, dass der Wert für die Versagenswahrscheinlichkeit f_{33}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0;LZB* des Ereignisses: „Der Triebfahrzeugführer hält unter Führung der LZB am Stellsignal an.“ im Bereich einer höheren negativen zweistelligen Zehnerpotenz liegt und somit in guter Näherung mit dem Wert null angenommen werden kann. Für diese Arbeit wird zur positiven Seite festgelegt f_{33}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0;LZB* = 0.

Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik $F_{32}^{\text{Stellung; ARdT, LZB-Führung, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ kann nun berechnet werden. Mit den beschriebenen Substitutionen ergibt sich:

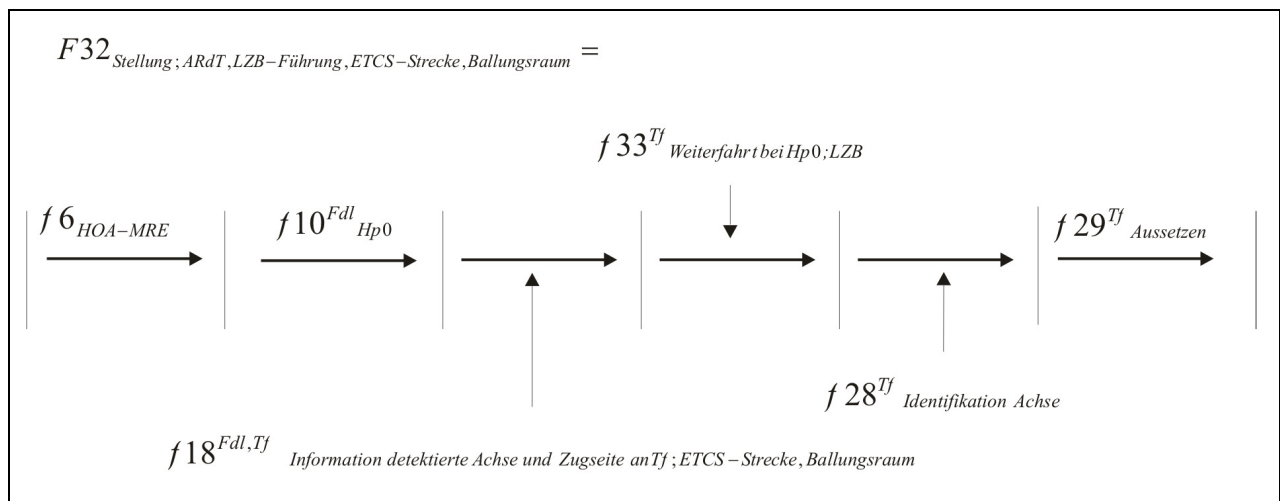


Abbildung 28: Pfeildarstellung der Formel 19

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

Formel 19

$$\begin{aligned}
 & F_{32}^{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}} \\
 &= f_{6_{HOA-MRE}} + f_{10_{Hp0}^{Fdl}} + f_{18_{Information\ detektierte\ Achse\ und\ Zugseite\ an\ Tf ; ETCS-Strecke , Ballungsraum}^{Fdl , Tf}} \\
 &+ f_{33_{Weiterfahrt\ bei\ Hp0 ; LZB}^{Tf}} + f_{28_{Identifikation\ Achse}^{Tf}} + f_{29_{Aussetzen}^{Tf}} \\
 &= 8 * 10^{-3} + 3 * 10^{-3} + 2,18 * 10^{-3} + 0 + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} \\
 &= 1,52 * 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f_{6_{HOA-MRE}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ (Formel 6),
- $f_{10_{Hp0}^{Fdl}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung (Formel 7),
- $f_{18_{Information\ detektierte\ Achse\ und\ Zugseite\ an\ Tf ; ETCS-Strecke , Ballungsraum}^{Fdl , Tf}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf Strecken in Ballungsräumen bzw. Strecken mit ETCS.“ (Formel 12),
- $f_{33_{Weiterfahrt\ bei\ Hp0 ; LZB}^{Tf}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält unter Führung der LZB am Stellsignal an.“,
- $f_{28_{Identifikation\ Achse}^{Tf}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ (Kapitel 3.2.5),
- $f_{29_{Aussetzen}^{Tf}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

Der Fehlerbaum mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F_{32}^{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}}$ als zugehörige Quantifizierung wird in der nachfolgenden Abbildung 29 gezeigt. Die Berechnung in Formel 19 enthält den gleichen Wert für $F_{32}^{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}}$, jedoch gerundet auf zwei Stellen nach dem Komma. Der Wert $F_{32}^{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}}$ in Formel 19 wird somit durch die Fehlerbaumquantifizierung bestätigt. Bei der Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung ergibt sich $F_{32}^{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}} = 0,01508$. Der Wert der Näherung und der exakten Berechnung für $F_{32}^{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}}$ differieren um

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

ca. 0,6 %, sodass auch hier von einer guten Näherung bei der Anwendung der Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ gesprochen werden kann.

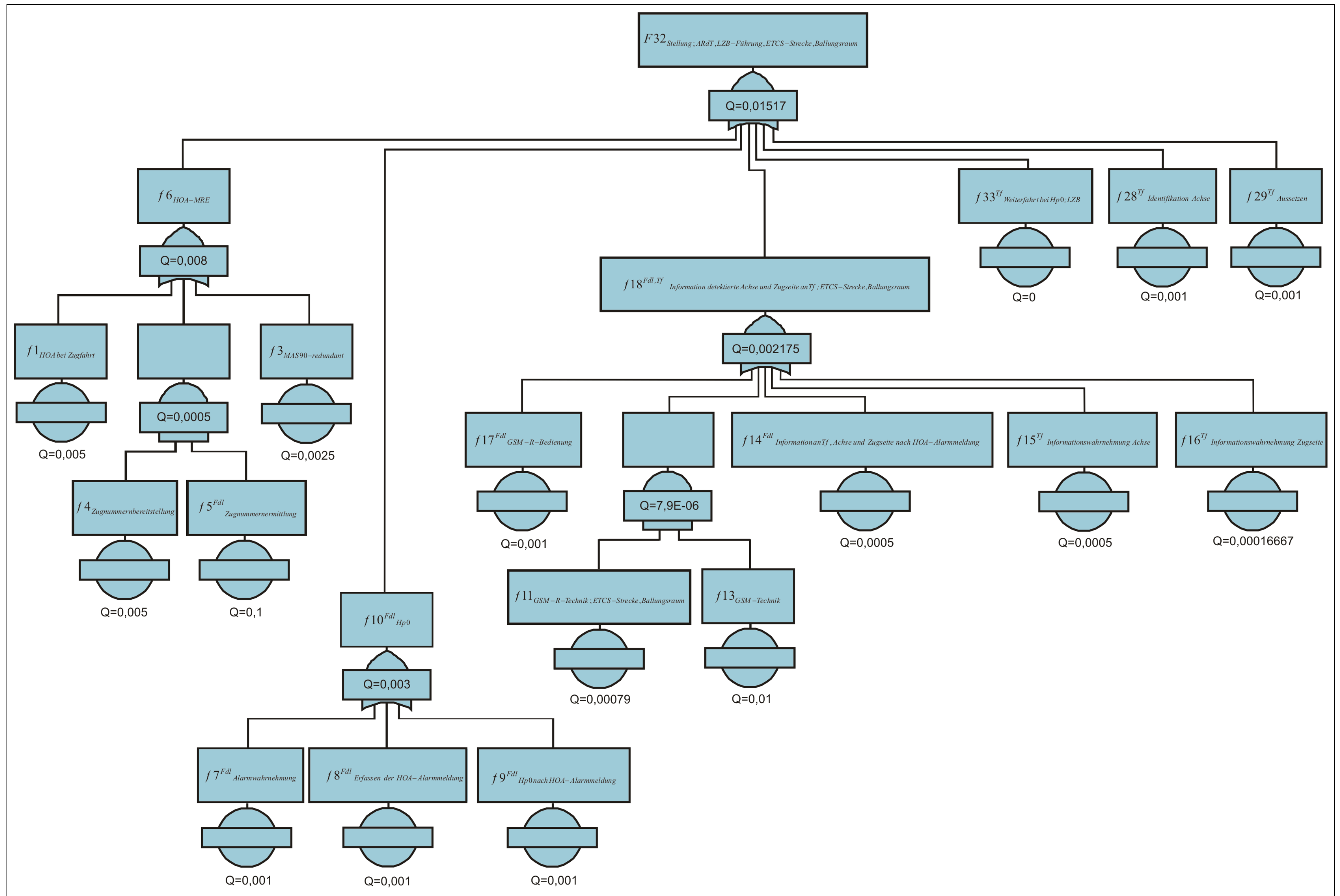


Abbildung 29: Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik mit $F32_{\text{Stellung; ARdT, LZB-Führung, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

Die Berechnung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F_{34}^{\text{Stellung; ARdT, LZB-Führung, sonstige Strecken}}$ der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik erfolgt abgewandelt aus Formel 18, indem $f_{27}^{\text{Tf, Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90}}$ durch $f_{33}^{\text{Tf, Weiterfahrt bei Hp0; LZB}}$ substituiert wird:

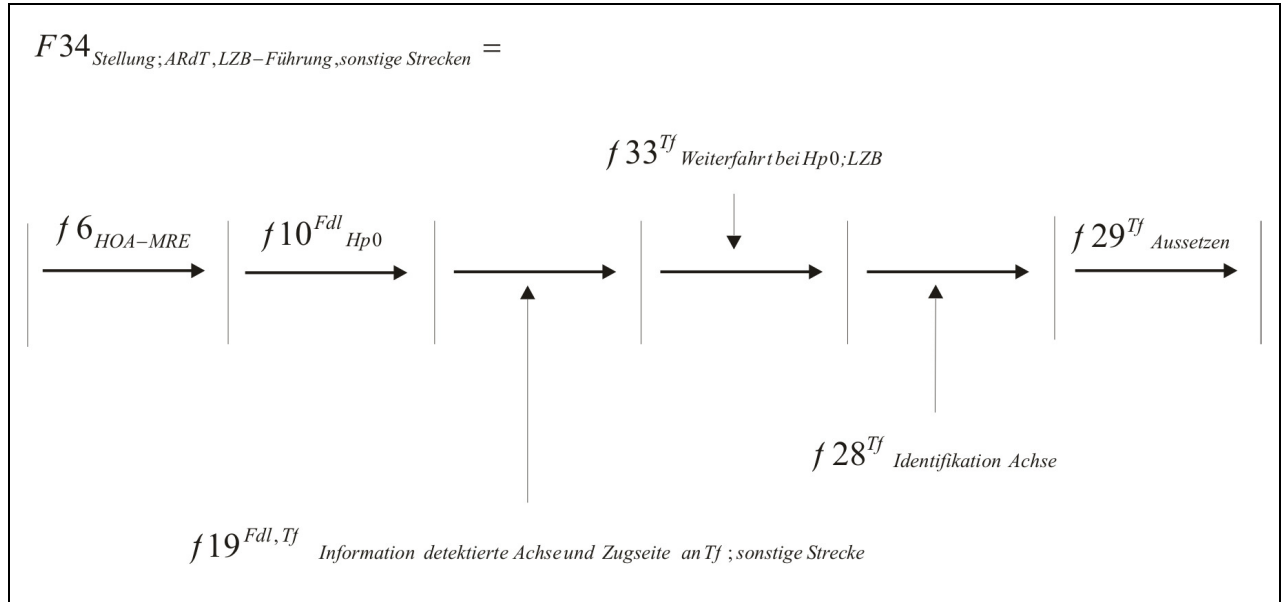


Abbildung 30: Pfeildarstellung der Formel 20

Formel 20

$$\begin{aligned}
 F_{34}^{\text{Stellung; ARdT, LZB-Führung, sonstige Strecken}} &= f_{6}^{\text{HOA-MRE}} + f_{10}^{\text{Fdl}_{Hp0}} + f_{19}^{\text{Fdl, Tf, Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; sonstige Strecke}} + \\
 &f_{33}^{\text{Tf, Weiterfahrt bei Hp0; LZB}} + f_{28}^{\text{Tf, Identifikation Achse}} + f_{29}^{\text{Tf, Aussetzen}} \\
 &= 8 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} + 2,21 \cdot 10^{-3} + 0 + 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} \\
 &= 1,52 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f_{6}^{\text{HOA-MRE}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ (Formel 6),
- $f_{10}^{\text{Fdl}_{Hp0}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung (Formel 7),

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

- $f_{19}^{Fdl, Tf}$ *Information detektierte Achse und Zugseite an Tf; sonstige Strecke* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf sonstigen Strecken.“ (Formel 13),
- f_{33}^{Tf} *Weiterfahrt bei Hp0; LZB* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält unter Führung der LZB am Stellsignal an.“ (Kapitel 3.3),
- f_{28}^{Tf} *Identifikation Achse* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ (Kapitel 3.2.5),
- f_{29}^{Tf} *Aussetzen* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

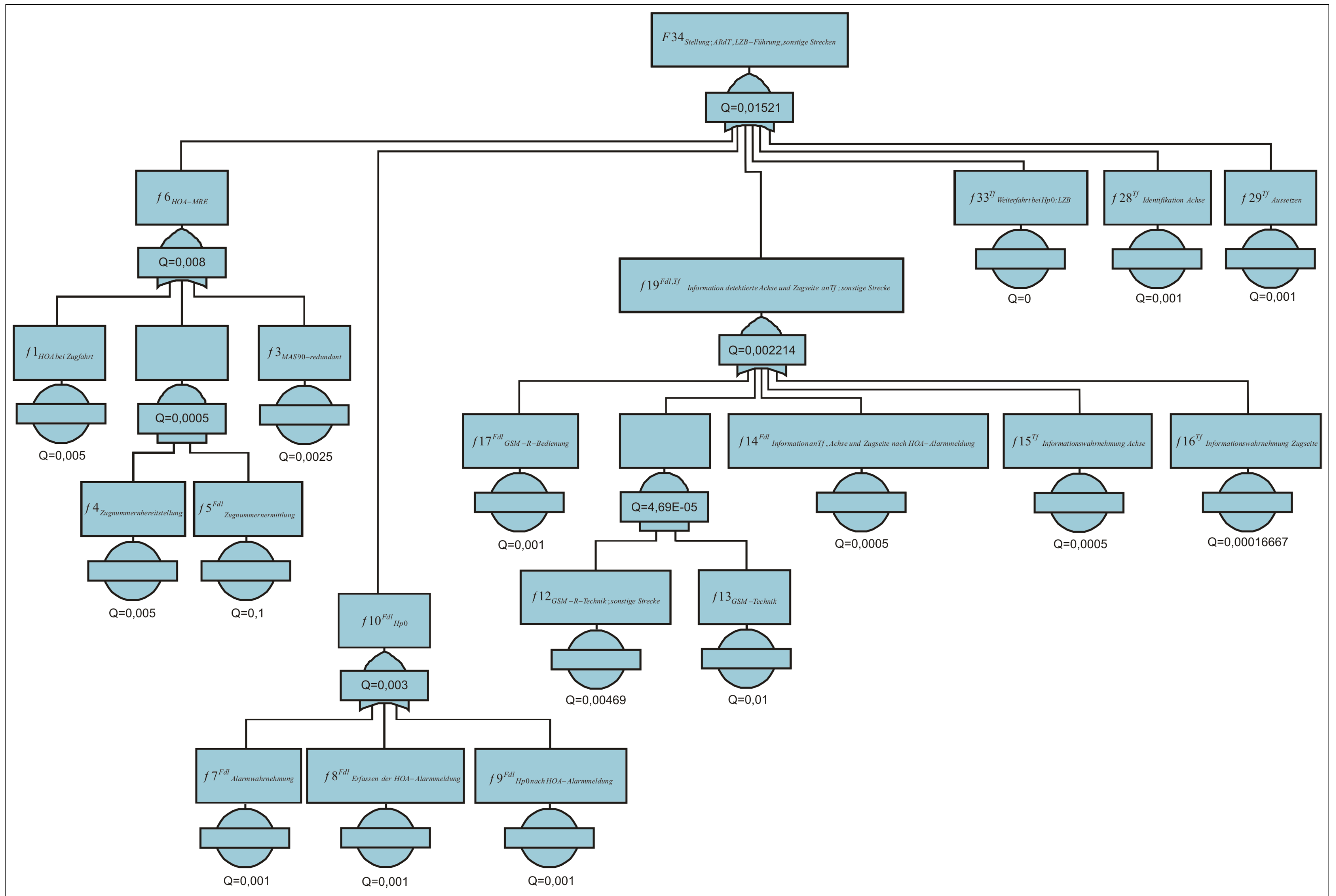


Abbildung 31: Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik mit $F34_{\text{Stellung; ARdT, LZB-Führung, sonstige Strecken}}$ unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung

Der Fehlerbaum mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F34_{\text{Stellung;ARdT,LZB-Führung,sonstige Strecken}}$ als zugehörige Quantifizierung wird in Abbildung 31 gezeigt. Die Berechnung in Formel 20 enthält den gleichen Wert für $F34_{\text{Stellung;ARdT,LZB-Führung,sonstige Strecken}}$, jedoch gerundet auf zwei Stellen nach dem Komma. Der Wert $F34_{\text{Stellung;ARdT,LZB-Führung,sonstige Strecken}}$ in Formel 20 wird somit durch die Fehlerbaumquantifizierung bestätigt. Bei der Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung ergibt sich $F34_{\text{Stellung;ARdT,LZB-Führung,sonstige Strecken}} = 0,01512$. Der Wert der Näherung und der exakten Berechnung für $F34_{\text{Stellung;ARdT,LZB-Führung,sonstige Strecken}}$ differieren um ca. 0,6 %, so dass eine gute Näherung bei der Anwendung der Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ vorliegt.

Die geringen Versagenswahrscheinlichkeiten für den Halt am Hp 0-zeigenden Stellsignal sowohl bei PZB-überwachten, wie auch bei LZB-geführten Zügen wirken sich in den Ergebnissen der Formel 19 gegenüber der Formel 17 und Formel 20 gegenüber der Formel 18 zahlenmäßig nicht aus. Grund hierfür ist, dass die weiteren Ereignisse der jeweiligen Ereigniskette eine um mehrere Zehnerpotenzen größere Versagenswahrscheinlichkeit besitzen.

Die nachfolgend in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten von der HOA-Detektion bis zum Aussetzen des betroffenen Fahrzeugs dürfen eine maximale Versagenswahrscheinlichkeit von $1,52 \cdot 10^{-2}$ auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (Formel 17 und Formel 19) nicht überschreiten, um gemäß [EBO 2012], § 2 Abs. 2 als gleich sicher gelten zu können. Gleiches gilt für sonstige Strecken.

Ereignisketten für ETCS-geführte Züge werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Grund hierfür ist, dass es derzeit in Deutschland noch keine Strecke gibt, auf der planmäßig Züge mit ETCS geführt werden. Dies wäre jedoch Voraussetzung, um Erfahrungen zur Verfügbarkeit von ETCS zu erhalten und diese dann in Ereignisketten mit ETCS-geführten Zügen einfließen zu lassen. In [EIS2 2000] ist folgende auch hier treffende Aussage enthalten: *„Kein mathematisches Modell und kein Labortest kann die raue Wirklichkeit des Bahnbetriebs vollständig nachbilden. Es ist daher unerlässlich, solche Anlagen unter realen Betriebsbedingungen am Gleis zu beurteilen.“*

Ebenfalls ist es aus Sicht des Autors nicht sinnvoll, Züge mit einem aktiven Zugbeeinflussungssystem „Geschwindigkeitsüberwachung Neigetechnik“ (GNT) in die Untersuchungen einzubeziehen. Im Güterverkehr in Deutschland gibt es bisher keine Züge, die unter Einfluss der GNT verkehren. Seit mehreren Jahren gilt dies auch für Züge des deutschen Schienenpersonenfernverkehrs sowie für den von den Bundesländern bestellten Schienenpersonennahverkehr. Lediglich einige wenige Zugrelationen, welche die DB Regio AG erbringt, werden noch unter Nutzung der aktiven GNT betrieben. Hierzu gehören u. a. die Strecken Leipzig – Chemnitz oder Dresden – Nürnberg. Ob nach der angedachten Elektrifizierung der Strecke Leipzig – Chemnitz [MDR 2013] dort weiter GNT-Zügen fahren werden, ist fraglich, da es derzeit keine elektrisch betriebenen Nahver-

3 - Quantifizierung des heutigen Systemdesigns zum Erreichen des sicheren Zustands von Zügen mit detektiertem Heißalarm, Alarm „Differenz Heiß“ oder Alarm „Feste Bremse Heiß“

kehrszüge mit aktiver GNT und keine Verlautbarungen für die Entwicklung solcher Fahrzeuge gibt.

4 Entwicklung neuer Systemdesigns zur Stellung HOA-detektierter Züge

In Kapitel 4 dieser Arbeit sollen Systemdesigns, die neue Ereignisketten zur Folge haben, erarbeitet werden. Ihre Umsetzung gegenüber den heutigen Ereignisketten ist planerisch, technisch und finanziell deutlich weniger aufwendig, und dies unter Beibehaltung der mindestens gleichen Sicherheit. Dabei wird das Stellen von HOA-detektierten Zügen nicht durch Sicherungstechnik am Stellsignal, sondern an einer Hektometertafel untersucht. Für die neuen Systemdesigns müssen sowohl neue technologische, prozessuale, wie auch technische Aspekte erarbeitet werden.

Hektometertafeln zeigen die Kilometrierung von Bahnstrecken an. Die Richtlinie [RIL 883.0010] enthält hierzu detaillierte Festlegungen:

„Alle im Streckenverzeichnis mit Streckennummern und Namen (von ... - nach ...) aufgeführten Strecken haben eine eigene Kilometrierung, die in Richtung der Namensnennung verläuft. Die Kilometrierung verläuft vom Anfangspunkt mittels Kilometrierungslinie zum Endpunkt der Strecke. (...)

Die Angaben von Streckennummer und Kilometer ermöglichen einen eindeutigen Bezug von Punkten einer Anlage (z. B. Betriebsstellen, Bauwerke, Sicherungsanlagen) entlang der Strecke, der, um ein Richtungskennzeichen ergänzt, die gleisbezogene Zuordnungen ermöglicht.“

Im Abschnitt 6 von [RIL 883.0010] wird die örtliche Kenntlichmachung der Kilometrierung an der Strecke erläutert. Hierzu wird ausgeführt:

„Die Kilometrierung ist in der Örtlichkeit durch Kilometer und Hektometertafeln kenntlich zu machen.“ „Auf den Hauptbahnen werden auf der freien Strecke alle geraden Hektometer gekennzeichnet, auf Nebenbahnen alle 500 m. Im Bereich von Bahnhöfen sind in der Regel nur Kilometerzeichen anzubringen.“ „Die Tafeln werden auf nicht elektrifizierten Strecken auf zuvor festgelegten Hektometerpunkten an Betonmasten befestigt, auf elektrifizierten Strecken an den nächstgelegenen Oberleitungsmasten.“

Folglich wären Hektometertafeln zum Stellen HOA-detektierter Züge mit ihrer streckenbezogenen, eindeutig zuordenbaren Kilometrierung in deutlich dichteren Abständen vorhanden als Stellsignale. Es würde sich in diesem Fall um keine gesonderten Tafeln handeln, sondern um Hektometertafeln, denen in der HOA-Alarmmeldung und dem darin genannten Stellort die Funktion eines Stellortes zugewiesen wird. Diese Hektometertafeln werden nachfolgend als HOA-Hektometer-Halt-Tafel (3H-Tafeln) bezeichnet.

Könnten diese als Stellort genutzt werden, stünde dem Planer einer HOA im Netz der DB Netz AG eine dichte Folge potenzieller Stellorte zur Verfügung.

Die regelkonforme Ausstattung der Strecke mit Hektometertafeln wird in dieser Arbeit vorausgesetzt. Das Vorhandensein der 3H-Tafeln muss im Rahmen des Baus der diesbezüglichen HOA und nach deren Inbetriebnahme durch regelmäßige Inspektionen sichergestellt werden.

Für die in Kapitel 4 entwickelten Systemdesigns gibt es bisher keine anerkannten Regeln der Technik. Aufgrund der Annahme aus Kapitel 3, wonach die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik als akzeptiert anzusehen sind, erfolgt die Prüfung hinsichtlich der gleichen Sicherheit durch einen Implizitvergleich zwischen den heutigen und den nachfolgend neu erarbeiteten Ereignisketten.

4.1 Ereignisketten des Stellens von Zügen mit Heißläufer an der 3H-Tafel einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs

Eine Unterscheidung zwischen LZB-geführten und PZB-überwachten Zügen ist bei der Stellung an einer 3H-Tafel nicht erforderlich, da diese ohne Mitwirkung einer Zugbeeinflussung erfolgt.

Gegenüber den heutigen Ereignisketten (Kapitel 3) entfällt bei der Stellung an der 3H-Tafel der Ablauf: „Fdl stellt Signalbild Hp 0 des Stellsignals sicher“ (vergleiche Abbildung 7 und folgende Abbildung 32). Weiterhin wird 3. aus Abbildung 7: „Fdl kommuniziert Tf erfolgreich die Alarmart, die detektierte Achse und bei einem Alarm, Differenz Heiß‘ bzw. Heißalarm die detektierte Zugseite“ durch 2. in Abbildung 32: „Fdl kommuniziert Tf erfolgreich die Alarmart, die detektierte Achse, die Kilometrierung der 3H-Tafel und bei einem Alarm ‚Differenz Heiß‘ bzw. Heißalarm die detektierte Zugseite“ ersetzt. Auch hier gilt, dass die Zugseite nur bei einem Heißalarm bzw. einem Alarm „Differenz Heiß“ von Bedeutung ist, nicht jedoch bei einem ebenfalls unter dem Begriff Heißläufer subsumierten Alarm „Feste Bremse Heiß“ (siehe Kapitel 3.2.3).

Eine Beschreibung der beiden neu zu entwickelnden Ereignisketten mit der Stellung an der 3H-Tafel:

- a) für Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen und
- b) für sonstige Strecken

folgt.

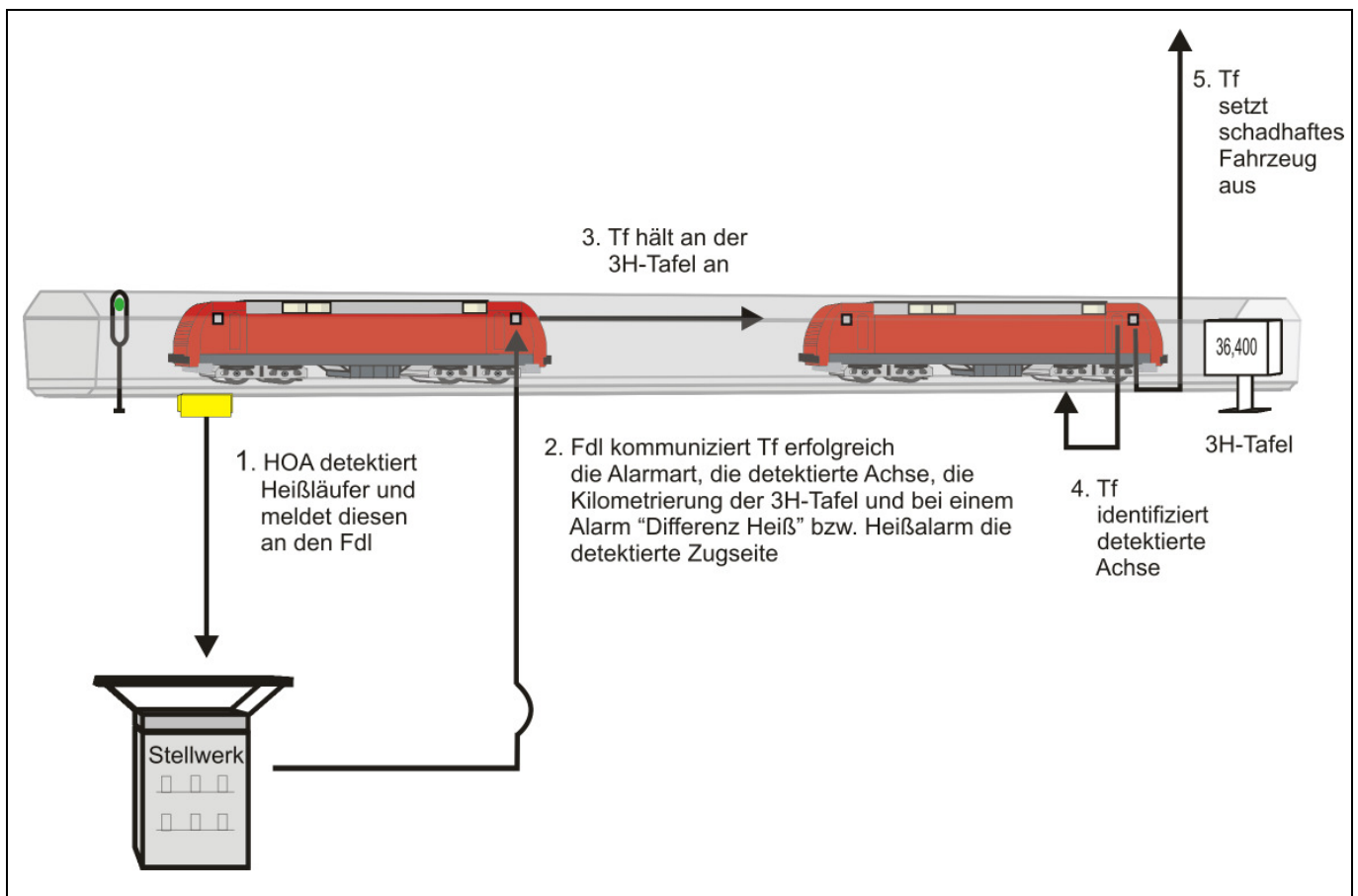


Abbildung 32: Darstellung der Abläufe nach einer HOA-Detektion mit der Stellung an der 3H-Tafel bis zum Aussetzen des detektierten Fahrzeugs

Nach der Detektion eines Heißläufers werden durch die HOA folgende Abläufe angestoßen (Abbildung 32):

1. Detektiert eine HOA einen Heißläufer, wird eine HOA-Alarmmeldung generiert. Die HOA-Alarmmeldung wird auf einem Monitor dem Fahrdienstleiter angezeigt, in dessen Stellbereich sich die 3H-Tafel für den HOA-detektierten Zug befindet.
2. Der Fahrdienstleiter stellt eine fernmündliche Verbindung zum Triebfahrzeugführer des detektierten Zuges her und teilt dem Triebfahrzeugführer die HOA-Alarmart, die betroffene Achse, die Kilometrierung der 3H-Tafel und bei einem Heißalarm oder Alarm „Differenz Heiß“ die detektierte Zugseite mit.
3. Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.
4. Nach dem Halt des Zuges an der 3H-Tafel verlässt der Triebfahrzeugführer den Führerstand und begibt sich zur detektierten Achse. Dabei zählt er, von der ersten Achse des Zuges am besetzten Führerstand beginnend, die Achsen des Zuges bis zur Nummer der in der HOA-Alarmmeldung angegebenen Heißläuferachse. Dort identifiziert der Triebfahrzeugführer den Heißläufer [RIL 408.0553].

5. Der Triebfahrzeugführer setzt das mit einem Heißläufer behaftete Fahrzeug aus. Dabei wird der betroffene Zug mit Schrittgeschwindigkeit in den nächsten Bahnhof eingefahren. Das defekte Fahrzeug ist aus dem Zugverband zu entfernen und in ein für Heißläuferabstellungen vorgesehenes Gleis zu rangieren [RIL 408.0553].

4.1.1 Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ bei der Stellung an der 3H-Tafel

Die Frage, ob der HOA-detektierte Zug am Stellsignal oder an der 3H-Tafel gestellt wird, hat keinen Einfluss auf die Detektion des Heißläufers und auch keinen auf die Übertragung der HOA-Alarmmeldung an den Fahrdienstleiter. Die Ausführungen aus Kapitel 3.2.1 treffen auch für die Stellung von HOA-detektierten Zügen an der 3H-Tafel zu. Daher gilt auch hier die Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ $f6_{HOA-MRE} = 8 \cdot 10^{-3}$.

4.1.2 Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel.“

Im Ablauf zu 2. in Abbildung 32 teilt der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer den Inhalt der HOA-Alarmmeldung mit. Im Unterschied zum äquivalenten Ablauf heute (Ablauf zu 3. in Abbildung 7) muss die HOA-Alarmmeldung neben der detektierten Achse und der Zugseite nun auch als dritte Information die Kilometrierung der 3H-Tafel enthalten, die dem Triebfahrzeugführer als Stellort vorzugeben ist.

Um zu gewährleisten, dass der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel kommuniziert, sind folgende Ereignisse erforderlich:

- Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung durch den Fahrdienstleiter mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f7^{Fdl}_{Alarmwahrnehmung}$ (Kapitel 3.2.2),
- inhaltliches Erfassen der HOA-Alarmmeldung durch den Fahrdienstleiter mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f8^{Fdl}_{Erfassen\ der\ HOA-Alarmmeldung}$ (Kapitel 3.2.2),
- die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung im Bereich von Ballungsräumen bzw. auf Strecken mit ETCS sowie auf sonstigen Strecken (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer) mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f11_{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}$ (Formel 8) sowie $f12_{GSM-R-Technik;sonstige\ Strecke}$ (Formel 9),

- der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f17^{Fdl}_{GSM-R-Bedienung}$ (Kapitel 3.2.3),
- der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden und die Kilometrierung der 3H-Tafel mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f37^{Fdl}_{Information\ detektierte\ Achse,\ Zugseite\ und\ 3H-Tafel\ an\ Tf}$, welche nachfolgend hergeleitet wird,
- der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f15^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Achse}$ (Kapitel 3.2.3),
- der Triebfahrzeugführer erfasst die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f38^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ 3H-Tafel}$, welche nachfolgend hergeleitet wird,
- der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig mit der Versagenswahrscheinlichkeit $f16^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Zugseite}$ (Formel 11).

Bei der fernmündlichen Weitergabe der drei Informationen an den Triebfahrzeugführer liest der Fahrdienstleiter diese aus der HOA-Alarmmeldung ab, sodass es sich hierbei nur um eine Handlung, nämlich das Vorlesen handelt, die als fertigkeitbasierend anzunehmen ist. Daraus folgt die Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden und die Kilometrierung der 3H-Tafel.“ $f37^{Fdl}_{Information\ detektierte\ Achse,\ Zugseite\ und\ 3H-Tafel\ an\ Tf} = 1 * 10^{-3}$. Die Versagenswahrscheinlichkeit von $f37^{Fdl}_{Information\ detektierte\ Achse,\ Zugseite\ und\ 3H-Tafel\ an\ Tf}$ wird zur sicheren Seite nicht weiter reduziert, da der Triebfahrzeugführer insbesondere bei einer falschen Weitergabe des Standortes der 3H-Tafel durch den Fahrdienstleiter keine Möglichkeit hat, diesen Fehler zu erkennen.

Die korrekte Wahrnehmung dieser drei Informationen wird als drei Aufgaben des Triebfahrzeugführers betrachtet, da der Triebfahrzeugführer diese als getrennte Informationen wahrnehmen muss, aus denen er unterschiedliche weitere Handlungen abzuleiten hat. Die Versagenswahrscheinlichkeit der Wahrnehmung der drei Informationen wird in $f15^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Achse}$, $f38^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ 3H-Tafel}$ und $f16^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Zugseite}$ abgebildet.

In dieser Arbeit wird zur sicheren Seite angenommen, dass die Ereigniskette versagt, wenn der Triebfahrzeugführer die Kilometrierung der 3H-Tafel nicht korrekt wahrnimmt. Denn daraus folgend würde der Zug an einem nicht dafür vorgesehenen Stellort zum Stehen kommen mit den genannten Folgen, die z. B. ein ungewollter Halt in einem Tunnel nach sich ziehen kann, was in dieser Arbeit als nicht akzeptabel festgelegt wurde. Das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst

die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig.“ wird als fertigkeitbasierende Handlung angenommen. Denn das Zuhören und Verstehen dieser Information durch den Triebfahrzeugführer beinhaltet die in [HINZ 1993] für fertigkeitbasierende Handlungen angenommene Voraussetzung, wonach der Mensch die Aufgabe eindeutig verstanden hat und mit automatisch ablaufenden Reaktionen ausführen kann. Diese Voraussetzungen können bei einem ausgebildeten Triebfahrzeugführer als gegeben betrachtet werden. Es ergibt sich daher die Versagenswahrscheinlichkeit $f38^{Tf}$ Informationswahrnehmung 3H-Tafel $= 1 * 10^{-3}$.

Die Versagenswahrscheinlichkeit für das in Kapitel 4.1.2 zu quantifizierende Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ $f35^{Fdl, Tf}$ Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; ETCS-Strecke, Ballungsraum wird wie folgt bestimmt:

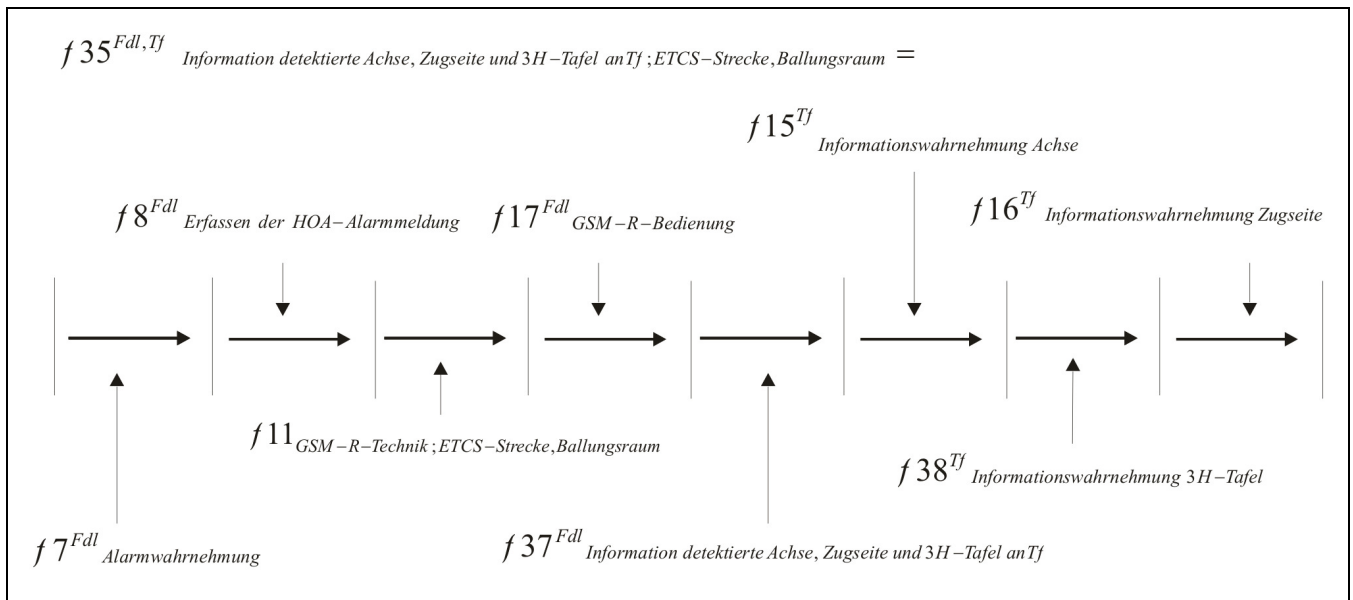


Abbildung 33: Pfeildarstellung der Formel 21

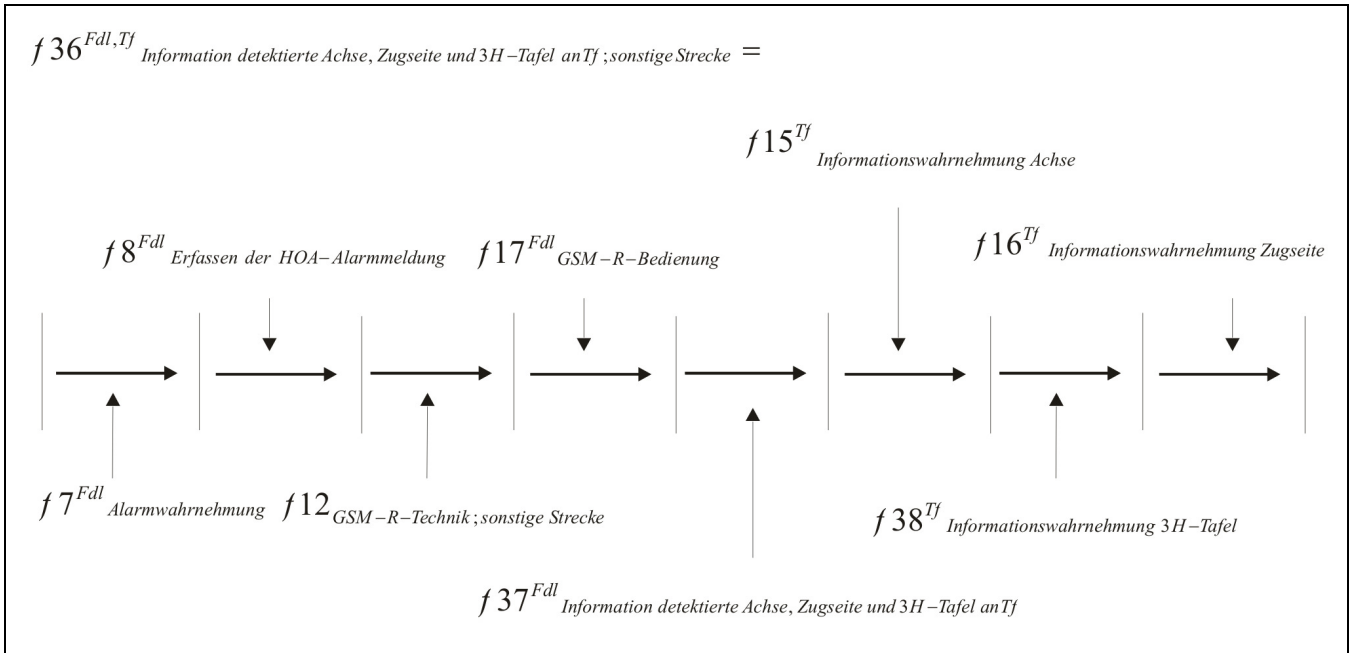
Formel 21

$$\begin{aligned}
 & f35^{Fdl, Tf} \text{ Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; ETCS-Strecke, Ballungsraum} \\
 &= f7^{Fdl} \text{ Alarmwahrnehmung} + f8^{Fdl} \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung} + f11^{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum} \\
 &+ f17^{Fdl} \text{ GSM-R-Bedienung} + f37^{Fdl} \text{ Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf} \\
 &+ f15^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse} + f38^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel} + f16^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite} \\
 &= 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 7,9 * 10^{-4} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 5 * 10^{-4} + 1 * 10^{-3} + \frac{5}{3} * 10^{-4} \\
 &= 6,46 * 10^{-3}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f7^{Fdl}$ *Alarmwahrnehmung* = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f8^{Fdl}$ *Erfassen der HOA-Alarmmeldung* = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters beim Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f11_{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 8),
- $f17^{Fdl}$ *GSM-R-Bedienung* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum detektierten Zug her.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f37^{Fdl}$ *Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf* = Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden und die Kilometrierung der 3H-Tafel.“ (Kapitel 4.1.2),
- $f15^{Tf}$ *Informationswahrnehmung Achse* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f38^{Tf}$ *Informationswahrnehmung 3H-Tafel* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig.“ (Kapitel 4.1.2),
- $f16^{Tf}$ *Informationswahrnehmung Zugseite* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (Formel 11).

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f36^{Fdl, Tf}$ *Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; sonstige Strecke* für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel auf sonstigen Strecken.“ wird aus Formel 21 abgeleitet, wobei $f11_{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ durch $f12_{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}$ ersetzt wird:

**Abbildung 34: Pfeildarstellung der Formel 22**

Formel 22

$$\begin{aligned}
 & f_{36}^{Fdl, Tf} \text{ Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; sonstige Strecke} \\
 &= f_{7}^{Fdl} \text{ Alarmwahrnehmung} + f_{8}^{Fdl} \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung} + f_{12}^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke} \\
 &+ f_{17}^{Fdl} \text{ GSM-R-Bedienung} + f_{37}^{Fdl} \text{ Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf} \\
 &+ f_{15}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse} + f_{38}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel} + f_{16}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite} \\
 &= 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 4,69 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-3} + \frac{5}{3} \cdot 10^{-4} \\
 &= 1,04 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- f_{7}^{Fdl} Alarmwahrnehmung = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- f_{8}^{Fdl} Erfassen der HOA-Alarmmeldung = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters beim Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f_{12}^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 9),
- f_{17}^{Fdl} GSM-R-Bedienung = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ (Kapitel 3.2.3),

- f_{37}^{Fdl} *Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf* = Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden und die Kilometrierung der 3H-Tafel.“ (Kapitel 4.1.2),
- f_{15}^{Tf} *Informationswahrnehmung Achse* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (Kapitel 3.2.3),
- f_{38}^{Tf} *Informationswahrnehmung 3H-Tafel* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig.“ (Kapitel 4.1.2),
- f_{16}^{Tf} *Informationswahrnehmung Zugseite* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (Formel 11).

4.1.3 Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“

Nachdem der Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer die Anweisung zum Halten an der 3H-Tafel erteilt hat, muss der Triebfahrzeugführer den Zug zur betreffenden 3H-Tafel führen.

Das Halten an der 3H-Tafel ist für den Triebfahrzeugführer ein Sonderfall, der nicht Bestandteil der täglichen Arbeit ist.

In [HINZ 1993] wird das Fahren auf Sicht als fertigkeitsbasierende Handlung definiert mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von $1 \cdot 10^{-3}$. Allerdings kann die Beobachtung des Fahrweges hinsichtlich des Erscheinens eines Fahrthindernisses (z. B. eines Eisenbahnfahrzeugs) im Fahrweg des Zuges nicht mit dem Herantasten an eine möglicherweise schlecht sichtbare 3H-Tafel gleichgesetzt werden. Bei schlechter Sicht oder bei Dunkelheit kann die Kenntlichkeit der 3H-Tafel beeinträchtigt sein.

Gleiches gilt für ggf. vorhandene Vegetation, die die Sicht auf 3H-Tafeln erschwert.



Abbildung 35: Eisenbahnstrecke mit problematischer Vegetationssituation [DRO 2007]

Ein diesbezügliches Beispiel zeigt Abbildung 35. Es ist demzufolge anzunehmen, dass hieraus Stress beim Triebfahrzeugführer während der Zielbremsung zur 3H-Tafel im Sinne der Tabelle 2 verursacht wird. Es ist von einer regelbasierenden Handlung unter Stress mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von $2 * 10^{-2}$ auszugehen.

Betrachtet wird in dieser Arbeit nur das Missachten der 3H-Tafel durch den Triebfahrzeugführer. Das Verbremesen oder Gleiten des Zuges, welches ebenfalls zum Überfahren der 3H-Tafel führen kann, wird nicht als relevant angesehen, wie in Kapitel 3.2.4 hinsichtlich des dort beschriebenen Überfahrens des Halt zeigenden Stellsignals. In [MASC ETR] liegt bei einem Drittel aller Vorbeifahrten am Halt zeigenden Signal das Missachten vor. Der Faktor ist daher ebenfalls zu berücksichtigen.

Für die Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“ ist daher anzunehmen:

Formel 23

$$f_{39}^{Tf} \text{ Halt an 3H-Tafel} = \frac{1}{3} * (2 * 10^{-2}) = \frac{2}{3} * 10^{-2}$$

mit:

- $f 39^{Tf}_{\text{Halt an 3H-Tafel}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“.

4.1.4 Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs

In Abwandlung der Formel 17 ergibt sich für die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F 40_{\text{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen:

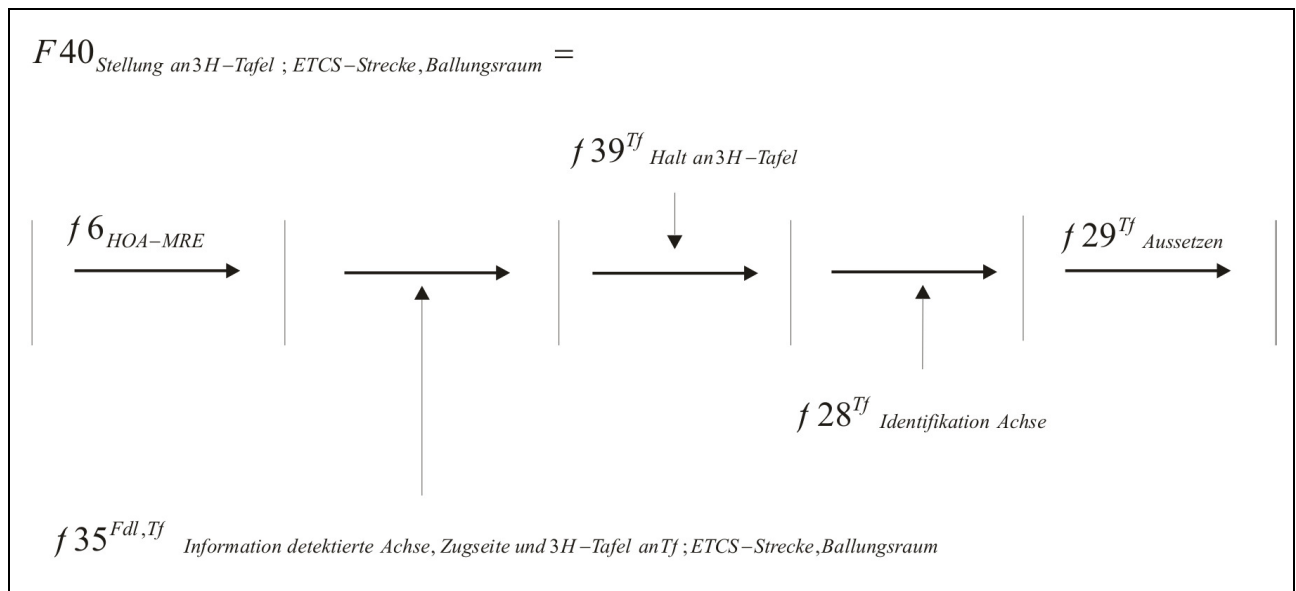


Abbildung 36: Pfeildarstellung der Formel 24

Formel 24

$$\begin{aligned}
 & F 40_{\text{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
 &= f 6_{\text{HOA-MRE}} + f 35^{Fdl, Tf}_{\text{Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
 &+ f 39^{Tf}_{\text{Halt an 3H-Tafel}} + f 28^{Tf}_{\text{Identifikation Achse}} + f 29^{Tf}_{\text{Aussetzen}} \\
 &= 8 * 10^{-3} + 6,46 * 10^{-3} + \frac{2}{3} * 10^{-2} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} \\
 &= 2,31 * 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f 6_{\text{HOA-MRE}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ (Formel 6),
- $f 35^{Fdl, Tf}_{\text{Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer er-

folgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ (Formel 21),

- $f_{39}^{Tf} \text{ Halt an 3H-Tafel}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“ (Formel 23),
- $f_{28}^{Tf} \text{ Identifikation Achse}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ (Kapitel 3.2.5),
- $f_{29}^{Tf} \text{ Aussetzen}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

Folgende Abbildung 37 zeigt den dazugehörigen quantifizierten Fehlerbaum. Das Ergebnis der eigenen Berechnung des Autors und das softwaregestützte Ergebnis stimmen überein. Der Wert $F_{40}^{\text{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ in Formel 24 wird somit durch die Fehlerbaumquantifizierung bestätigt. Bei der Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung ergibt sich für $F_{40}^{\text{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ der Wert 0,0229. Somit unterscheidet sich das Näherungsergebnis von dem exakten Ergebnis um lediglich ca. 0,9 %.

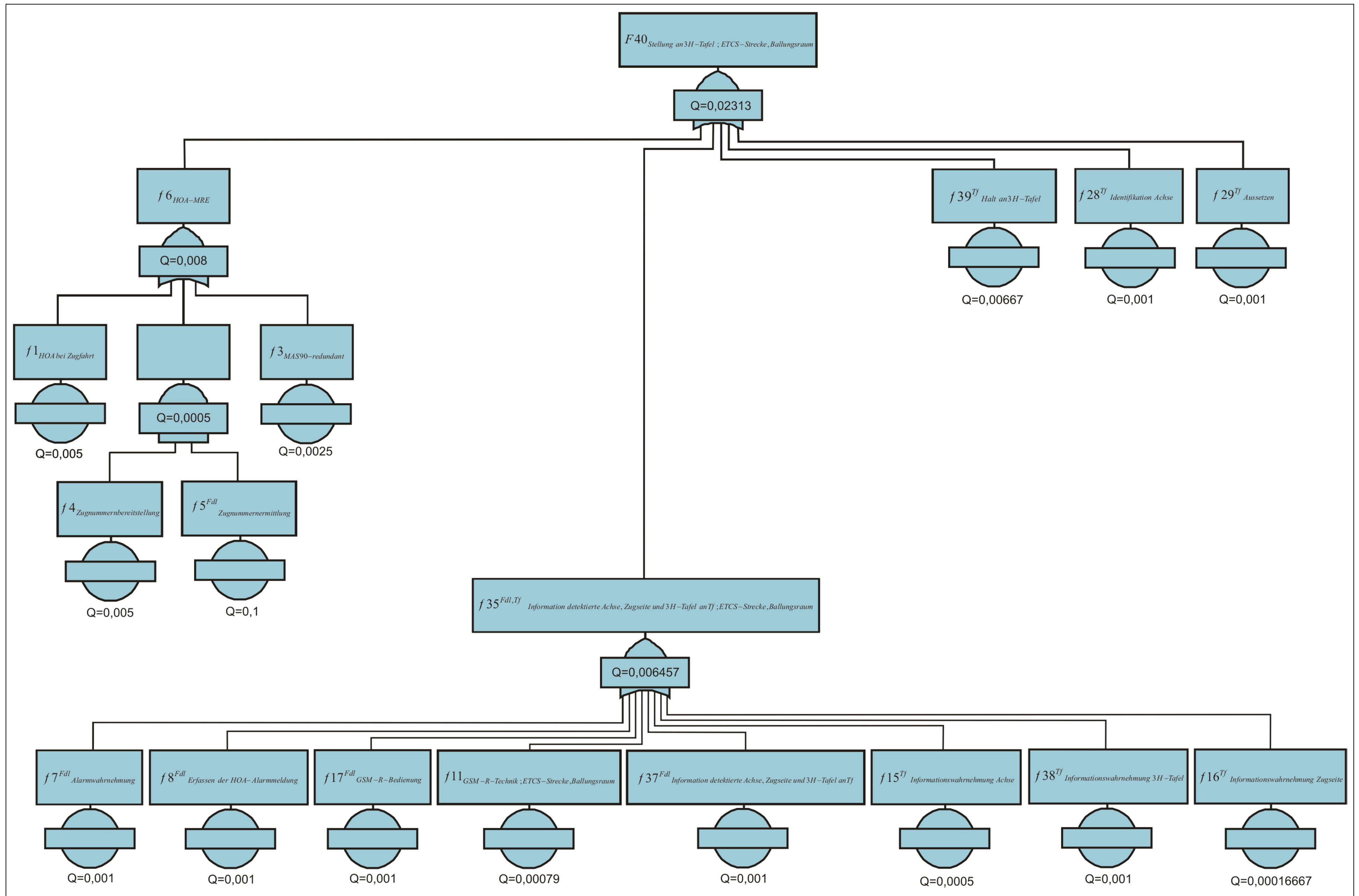


Abbildung 37: Fehlerbaum für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißbläuerfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen mit $F40$ (Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke, Ballungsraum) unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung

Aus Formel 18 zur Berechnung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit für PZB-überwachte Züge auf sonstigen Strecken wird die Gleichung für die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F41_{\text{Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke}}$ der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken abgeleitet:

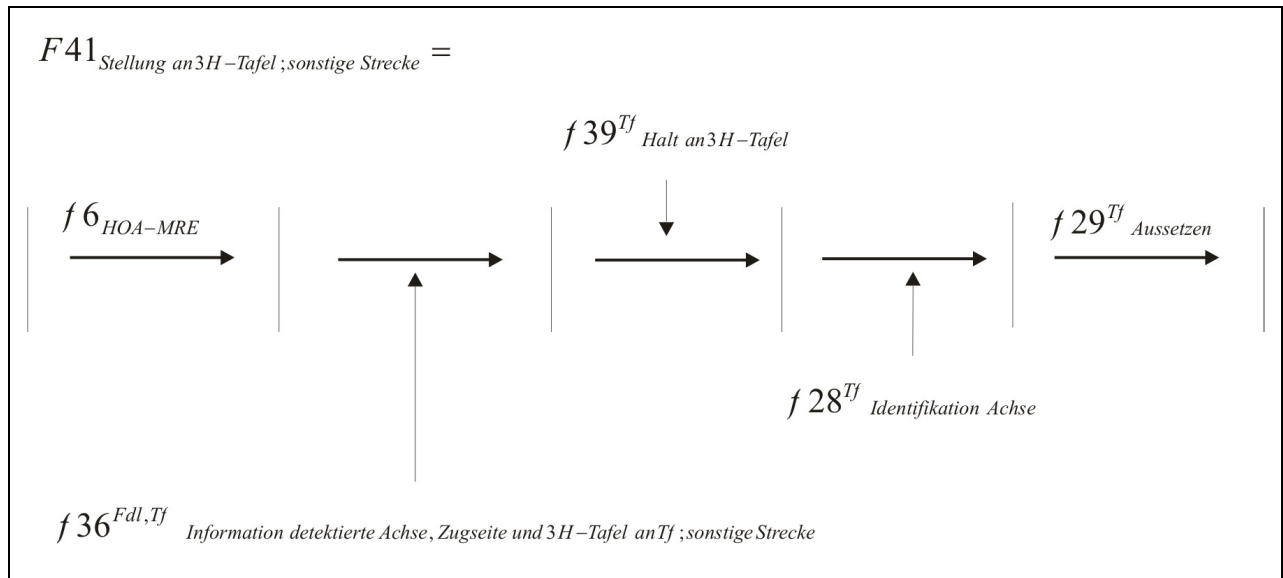


Abbildung 38: Pfeildarstellung der Formel 25

Formel 25

$$\begin{aligned}
 F41_{\text{Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke}} &= f 6_{\text{HOA-MRE}} + f 36_{\text{Fdl, Tf Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; sonstige Strecke}} \\
 &+ f 39_{\text{Tf Halt an 3H-Tafel}} + f 28_{\text{Tf Identifikation Achse}} + f 29_{\text{Tf Aussetzen}} \\
 &= 8 \cdot 10^{-3} + 1,04 \cdot 10^{-2} + \frac{2}{3} \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} \\
 &= 2,71 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f 6_{\text{HOA-MRE}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ (Formel 6),
- $f 36_{\text{Fdl, Tf Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; sonstige Strecke}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel auf sonstigen Strecken.“ (Formel 22),
- $f 39_{\text{Tf Halt an 3H-Tafel}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“ (Formel 23),

- f_{28}^{Tf} *Identifikation Achse* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ (Kapitel 3.2.5),
- f_{29}^{Tf} *Aussetzen* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

Der Fehlerbaum mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F_{41}^{\text{Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke}}$ wird in der nachfolgenden Abbildung 39 gezeigt. Deren Wert weicht geringfügig von dem aus Formel 25 zu entnehmenden Betrag ab. Die Abweichung resultiert aus dem Runden des Wertes von $f_{36}^{Fdl, Tf}$ *Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; sonstige Strecke* auf zwei Stellen nach dem Komma. Somit wird der Wert $F_{41}^{\text{Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke}}$ in Formel 25 durch die Fehlerbaumquantifizierung bestätigt. Bei der Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung ergibt sich $F_{41}^{\text{Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke}} = 0,02672$. Die Werte der Näherung und der exakten Berechnung für $F_{41}^{\text{Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke}}$ differieren um ca. 1 %, sodass auch hier von einer guten Näherung bei der Anwendung der Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ gesprochen werden kann.

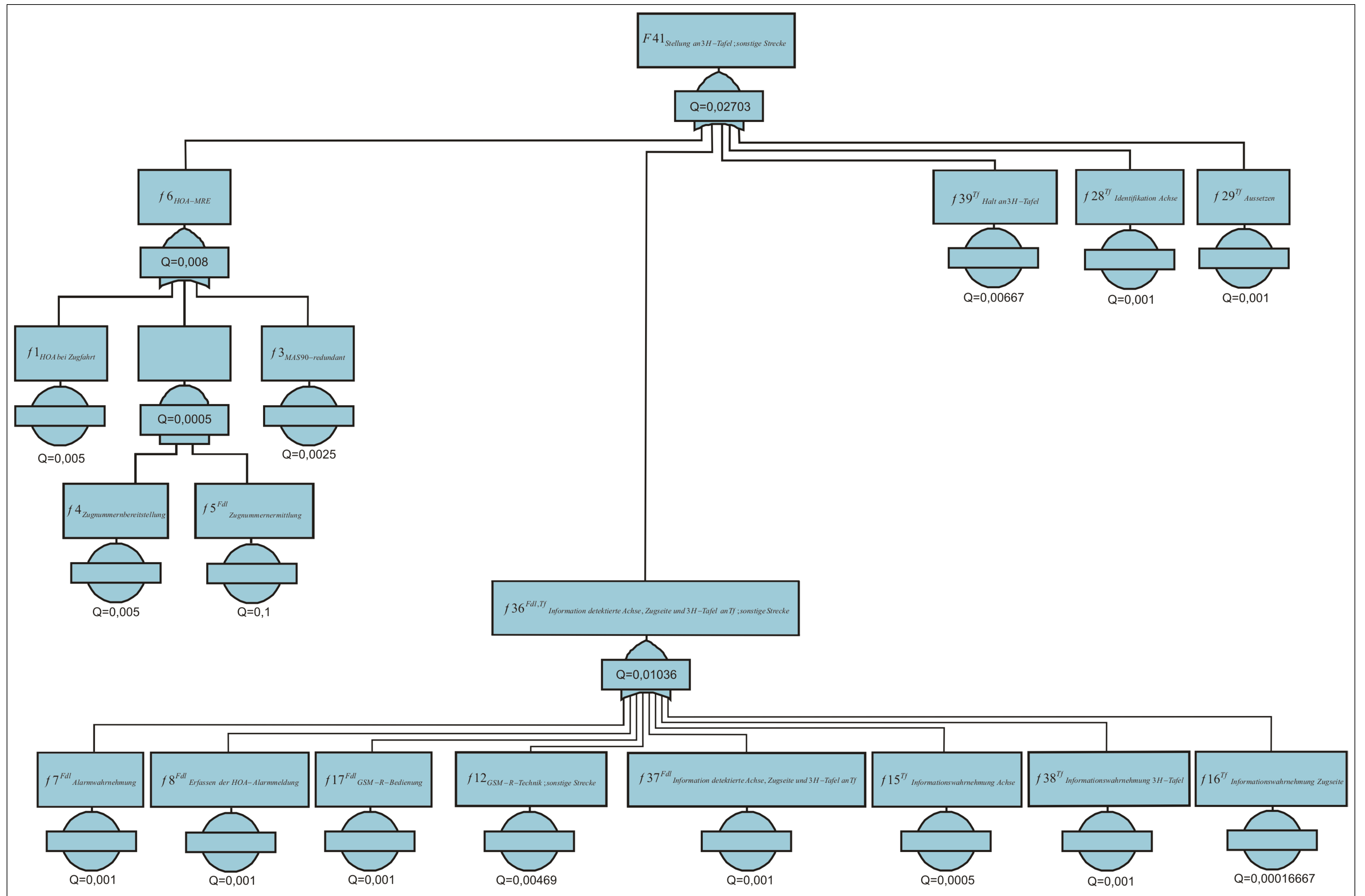


Abbildung 39: Fehlerbaum für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißbläuerfahrzeugs auf sonstigen Strecken mit $F41$ (Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke) unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung

Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F40_{\text{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen ergibt den Wert $2,31 \cdot 10^{-2}$ (Formel 24). Der Wert ist größer als die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten $F30_{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ und $F32_{\text{Stellung ; ARdT, LZB-Führung, ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik mit $1,52 \cdot 10^{-2}$ (Formel 17 und Formel 19). Der Nachweis der gleichen Sicherheit nach § 2 Abs. 2 aus [EBO 2012] ist nicht erbracht. Gleiches gilt, wie nachfolgend aus der folgenden Tabelle 3 zu entnehmen ist, auch für sonstige Strecken.

Daher ist ohne zusätzliche Maßnahmen keine Substitution des Stellens eines Zuges am Stellsignal nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik durch das Stellen an einer 3H-Tafel möglich.

Ereignisketten	für Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen	für sonstige Strecken
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs <u>nach heutigen anerkannten Regeln der Technik</u>	$F30_{\text{Stellung ; ARdT , PZB90 , ETCS-Strecke , Ballungsraum}} =$ $1,52 * 10^{-2}$	$F31_{\text{Stellung ; ARdT , PZB90 , sonstige Strecken}} =$ $1,52 * 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs, <u>nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik</u>	$F32_{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}} =$ $1,52 * 10^{-2}$	$F34_{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , sonstige Strecken}} =$ $1,52 * 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs	$F40_{\text{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke , Ballungsraum}} =$ $2,31 * 10^{-2}$	$F41_{\text{Stellung an 3H-Tafel ; sonstige Strecke}} =$ $2,71 * 10^{-2}$

Tabelle 3: Übersicht der bis hier in dieser Arbeit errechneten Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$, wobei die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten für die Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik kleiner sind, als die der Ereignisketten für das Stellen von Zügen mit Heißläufer an der 3H-Tafel

4.2 Stellen von HOA-detektierten Zügen an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer

Da eine einfache Substitution des Stellsignals durch eine 3H-Tafel noch keinen Nachweis gleicher Sicherheit für die diesbezüglichen Ereignisketten ermöglicht (siehe Kapitel 4.1), sind weitere Maßnahmen erforderlich. Diese weiteren Maßnahmen sollen die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens und Aussetzens des detektierten Heißläuferfahrzeugs soweit absenken, dass bei Nutzung der 3H-Tafel zum Stellen keine höhere Gesamtversagenswahrscheinlichkeit auftritt als beim heutigen Stellen am Stellsignal.

Die HOA-Alarmmeldung wird derzeit durch Technik an den Fahrdienstleiter übertragen. Jedoch ist es die Aufgabe des Triebfahrzeugführers, den HOA-detektierten Zug am vorgegebenen Stellort, d. h. derzeit am Stellsignal, anzuhalten, den Heißläufer zu identifizieren und auszusetzen. Da der Triebfahrzeugführer von einer HOA-Alarmmeldung nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik erst nachgelagert vom Fahrdienstleiter informiert wird, liegt es nahe, zusätzlich eine technische Übertragung der HOA-Alarmmeldung direkt zum Triebfahrzeugführer vorzusehen.

Ob durch eine redundante Übertragung der HOA-Alarmmeldung zum Fahrdienstleiter und zusätzlich direkt zum Triebfahrzeugführer ein Sicherheitsgewinn realisiert werden kann, der einen Nachweis gleicher Sicherheit ermöglicht, wird nachfolgend untersucht.

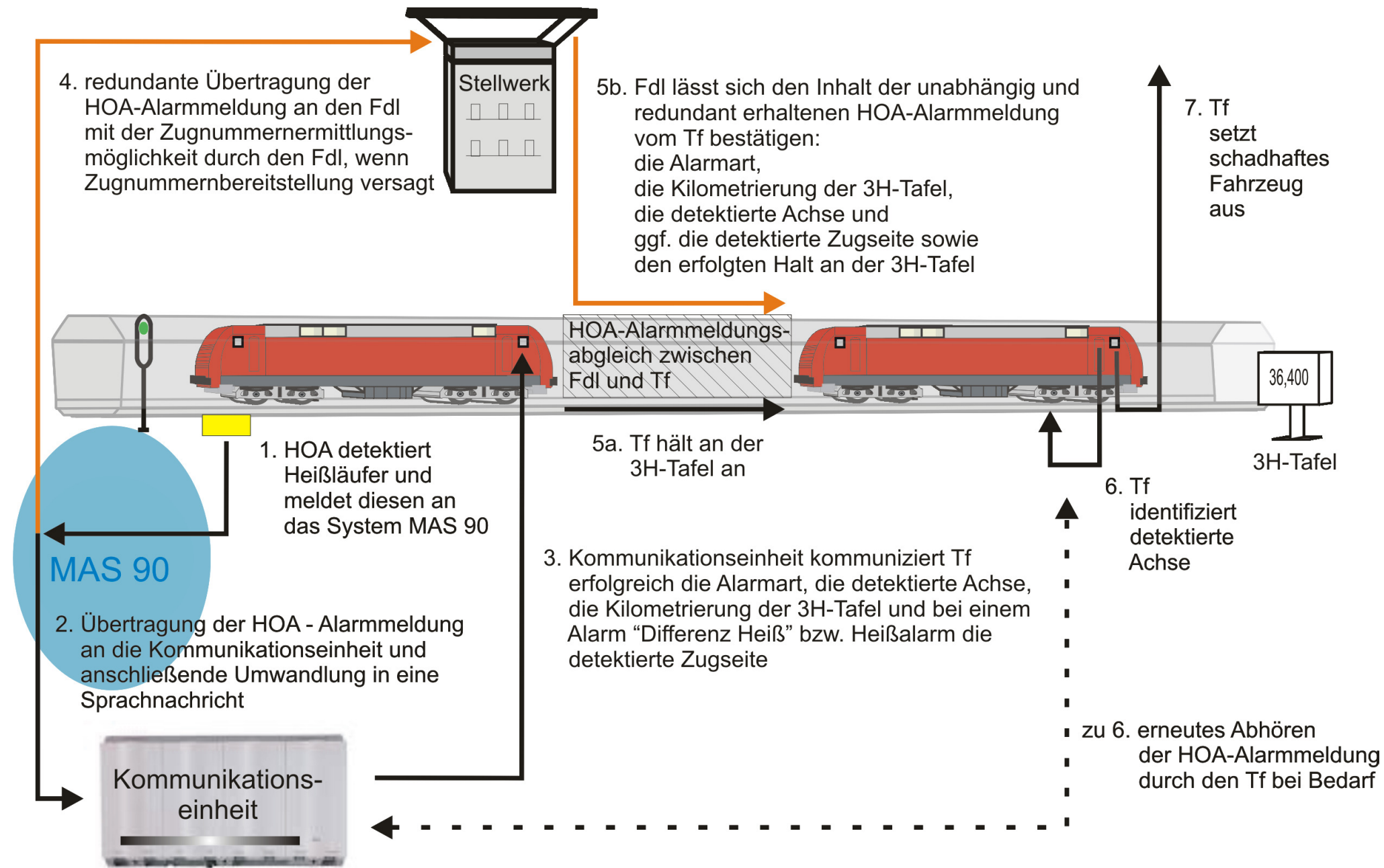


Abbildung 40: Darstellung der Abläufe des Stellens von Zügen mit Heißläufer an der 3H-Tafel einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs und mit direkter HOA-Alarmmeldungsübertragung zum Triebfahrzeugführer (schwarze Pfeile) und redundanter HOA-Alarmmeldungsübertragung an den Fahrdienstleiter (orange Pfeile) mit HOA-Alarmmeldungsabgleich zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer

Die Abläufe für die Stellung von Zügen mit einem Heißläufer an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs und mit direkter HOA-Alarmmeldungsübertragung zum Triebfahrzeugführer (Abbildung 40) werden nachfolgend beschrieben:

1. Die HOA detektiert einen Heißläufer und meldet diesen an das System MAS 90. Dies initiiert die redundanten Abläufe 2., 3. und 5a. sowie 4. und 5b. .
2. Die HOA-Alarmmeldung wird von der MAS 90 mit der Zugnummer an die neu zu entwickelnde Kommunikationseinheit gesendet. Nach Erhalt der HOA-Alarmmeldung wandelt die Kommunikationseinheit die Inhalte der HOA-Alarmmeldung in eine Sprachnachricht um. Diese Sprachnachricht wird in der Kommunikationseinheit gespeichert.
3. Die Kommunikationseinheit stellt eine höher als gewöhnliche Gespräche priorisierte fernmündliche Verbindung mit GSM-R zum Triebfahrzeugführer her und teilt diesem mittels Sprachnachricht den Inhalt der HOA-Alarmmeldung mit. In der Sprachnachricht wird zusätzlich eine Rufnummer genannt, unter der die HOA-Alarmmeldung später bei Bedarf erneut abgehört werden kann. Die Sprachnachricht wird wiederholt, bis der Triebfahrzeugführer den Inhalt der HOA-Sprachnachricht vollumfassend erfasst und der Triebfahrzeugführer dies mit einer Funktionstastenbedienung bestätigt hat.
4. Es entsteht eine parallele und somit redundante HOA-Alarmmeldungsübertragung sowohl zum Triebfahrzeugführer als auch, wie nach heutigen anerkannten Regeln der Technik, zum Fahrdienstleiter. Ist in der HOA-Alarmmeldung keine Zugnummer enthalten, kann der Fahrdienstleiter diese, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, ermitteln.
5. Der Ablauf zu 5. wird in 5a. und 5b. untergliedert. In 5a. hält der Triebfahrzeugführer an der in der HOA-Alarmmeldung genannten 3H-Tafel an.

Zeitgleich hierzu stellt der Fahrdienstleiter in 5b. eine fernmündliche Verbindung zum Triebfahrzeugführer her. Danach lässt sich der Fahrdienstleiter den Inhalt der HOA-Alarmmeldung durch den Triebfahrzeugführer bestätigen. Der Fahrdienstleiter korrigiert den Triebfahrzeugführer, wenn der Triebfahrzeugführer die HOA-Alarmmeldung nicht korrekt erfasst oder nicht erhalten hat. Der Fahrdienstleiter hält die fernmündliche Verbindung aufrecht, bis der Triebfahrzeugführer den Halt an der 3H-Tafel bestätigt.

6. Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Achse. Im Unterschied zur heutigen Verfahrensweise kann der Triebfahrzeugführer bei Bedarf während der Identifizierung der Heißläuferachse über die Kommunikationseinheit erneut die HOA-Alarmmeldung abhören.
7. Der Triebfahrzeugführer setzt, wie bereits derzeit, das Heißläufer-immanente Fahrzeug aus.

4.2.1 Das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen an das System MAS 90“

Wie aus Ablauf 1. in Abbildung 40 hervorgeht, meldet die HOA einen detektierten Heißläufer an das System MAS 90.

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{42_{HOA-MAS90-redundant}}$ für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen an das System MAS 90“ ergibt sich wie folgt:

Formel 26

$$f_{42_{HOA-MAS90-redundant}} = f_{1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}}} + f_{3_{MAS90-redundant}} = 5 * 10^{-3} + 2,5 * 10^{-3} = 7,5 * 10^{-3}$$

mit:

- $f_{1_{HOA \text{ bei Zugfahrt}}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der HOA bei Überfahrt eines Zuges mit Heißläufer (Formel 2),
- $f_{3_{MAS90-redundant}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Systems MAS 90 mit redundanten Komponenten bei HOA-Befahrung eines Zuges (Formel 4).

4.2.2 Das Ereignis: „Die HOA-Alarmmeldung wird von der MAS 90 mit der Zugnummer an die Kommunikationseinheit übertragen.“

Damit die Kommunikationseinheit (KE) die vom System MAS 90 erhaltene HOA-Alarmmeldung in eine Sprachnachricht umwandeln kann (2. in Abbildung 40), muss ebenfalls die Zugnummer, welche der Zugnummerndecoder bereitstellt, in der HOA-Alarmmeldung enthalten sein. Die Kommunikationseinheit muss darüber hinaus die Fähigkeit besitzen, den Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges mittels GSM-R anzurufen.

Für die zu entwickelnde Kommunikationseinheit wird eine Versagenswahrscheinlichkeit $f_{43_{KE}}$ festgelegt, die der des redundanten Systems MAS 90 (Formel 4) entspricht und die somit $f_{43_{KE}} = 2,5 * 10^{-3}$ beträgt. Diese Versagenswahrscheinlichkeit ist mit dem heutigen Stand der Technik realisierbar und wie beim System MAS 90 als akzeptabel anzunehmen. Der Wert ist im Lastenheft für die Kommunikationseinheit festzuhalten.

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems MAS 90 wurde bereits in der Formel 26 berücksichtigt. In 2. in Abbildung 40 treten somit zwei Versagenswahrscheinlichkeiten auf:

- $f_{4_{Zugnummernbereitstellung}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 (= $5 * 10^{-3}$, Formel 6) und
- $f_{43_{KE}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Kommunikationseinheit (= $2,5 * 10^{-3}$).

4.2.3 Das Ereignis: „Die Kommunikationseinheit kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die Alarmart, die detektierte Achse, die Kilometrierung der 3H-Tafel und bei einem Alarm ‚Differenz Heiß‘ bzw. Heißalarm die detektierte Zugseite.“

Die in der Kommunikationseinheit in eine Sprachnachricht umgewandelte HOA-Alarmmeldung wird mittels GSM-R an den Triebfahrzeugführer gesendet (siehe 3. in Abbildung 40). Hierzu nutzt die Kommunikationseinheit die zugnummernbasierende Rufmöglichkeit und ruft den Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges an. Der Ruf muss priorisiert sein, damit der Ruf andere fernmündliche Gespräche, die der Triebfahrzeugführer mittels GSM-R zu diesem Zeitpunkt führt, abbricht. Es wird angenommen, dass sich der Triebfahrzeugführer während der Fahrt auf dem Führerstand befindet und durch das eindeutige Rufsignal, die Priorisierung und die Konzentration auf das Fahren den eingehenden Ruf der Kommunikationseinheit wahrnimmt. Nimmt der Triebfahrzeugführer den Ruf an, spielt die Kommunikationseinheit die Sprachnachricht ab. Der Triebfahrzeugführer bestätigt der Kommunikationseinheit mittels Funktionstaste, dass er die Sprachnachricht vollumfänglich verstanden hat.

Die Kommunikationseinheit hat ein mehrfaches Abhören der Sprachnachricht mittels einer weiteren Funktionstaste zu ermöglichen.

Des Weiteren muss die Kommunikationseinheit dem Triebfahrzeugführer eine Rufnummer mitteilen, unter der er die Sprachnachricht im Nachgang erneut abhören kann.

Folgende Maßnahme könnte zusätzlich vorgesehen werden:

Erfolgt innerhalb einer festgelegten Zeitspanne keine Bedienung der Bestätigungsfunktionstaste durch den Triebfahrzeugführer, sendet die Kommunikationseinheit dem Fahrdienstleiter, in dessen Stellbereich sich die 3H-Tafel befindet, eine Fehlermeldung. Das Ausbleiben der Bedienung der Bestätigungsfunktionstaste kann beispielsweise durch das Nicht-Zustandekommen der Verbindung zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer verursacht sein oder durch eine Unverständlichkeit der HOA-Alarmmeldung aufgrund unzureichender Sprachqualität. Der Fahrdienstleiter wird in der Fehlermeldung informiert, dass der Triebfahrzeugführer keine Kenntnis von der HOA-Alarmmeldung erhalten hat. In diesem Fall kann der Fahrdienstleiter weitere Handlungen einleiten, z. B. den HOA-detektierten Zug am nächsten möglichen Hauptsignal anhalten oder per Notruf zum Halten auffordern, je nachdem, was beispielsweise für diesen Fall in den Örtlichen Richtlinien festgelegt wurde. Der Erfolg der zusätzlichen Maßnahme ist nicht auszuschließen, jedoch ungewiss. Daher wird ein möglicher Erfolg dieser zusätzlichen Maßnahme in dieser Arbeit zur sicheren Seite nicht berücksichtigt.

In 3. in Abbildung 40 treten folgende Versagenswahrscheinlichkeiten auf:

1. $f_{11}^{f_{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung im Bereich von Ballungsräumen bzw. auf Strecken mit ETCS (hier zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer).“ (= $7,9 \cdot 10^{-4}$, Formel 8),
bzw. auf sonstigen Strecken:
 $f_{12}^{f_{GSM-R-Technik;sonstige\ Strecke}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken (hier zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer).“ (= $4,69 \cdot 10^{-3}$, Formel 9),
2. $f_{15}^{Tf_{Informationswahrnehmung\ Achse}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (= $5 \cdot 10^{-4}$, Kapitel 3.2.3),
3. $f_{16}^{Tf_{Informationswahrnehmung\ Zugseite}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (= $\frac{5}{3} \cdot 10^{-4}$, Formel 11),
4. $f_{38}^{Tf_{Informationswahrnehmung\ 3H-Tafel}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig.“ (= $1 \cdot 10^{-3}$, Kapitel 4.1.2).

Die Betätigung der Bestätigungsfunktionstaste wird als Teil der Informationswahrnehmung angesehen. Eine diesbezügliche Nicht- oder Fehlbedienung des Triebfahrzeugführers bei korrekter Wahrnehmung der drei Informationen wäre unkritisch, da in deren Folge der Triebfahrzeugführer die HOA-Alarmmeldung dennoch wahrgenommen hat und der Fahrdienstleiter fälschlicherweise annimmt, dass der Triebfahrzeugführer die HOA-Alarmmeldung nicht erhielt.

Nachfolgend soll diskutiert werden, welche Fehler des Triebfahrzeugführers dazu führen können, dass dieser von der Kommunikationseinheit nicht mit GSM-R erreicht werden kann und die Ereigniskette somit versagt.

Es gibt zwei wichtige Szenarien, bei denen sich eingeschränkte bzw. nicht verfügbare GSM-R-Funktionalitäten nicht unmittelbar offenbaren. Das erste Szenario tritt ein, wenn das GSM-R-Endgerät auf dem Führerstand nicht eingeschaltet ist. Beginnt der Triebfahrzeugführer die Fahrt mit einem Zug, meldet sich der Triebfahrzeugführer häufig vor der Abfahrt beim Fahrdienstleiter mittels GSM-R hinsichtlich der Abfahrmodalitäten. Dass das GSM-R-Endgerät nicht eingeschaltet ist, wird ihm in diesem Zusammenhang auffallen. Auch melden sich Fahrdienstleiter bei Verzögerungen der Abfahrt oder sonstigen Besonderheiten beim Triebfahrzeugführer. Ein nicht eingeschaltetes GSM-R-Endgerät auf dem Führerstand würde sich hierbei ebenfalls offenbaren.

Übernimmt der Triebfahrzeugführer einen Zug im Rahmen eines Lokpersonalwechsels (Lpw), müssten sowohl der bis zum Lpw tätige wie auch der ablösende Triebfahrzeugführer dies nicht bemerken, damit der Zustand unentdeckt bliebe. Ebenfalls dürften aufseiten des Triebfahrzeugführers keine anderen Kommunikationsnotwendigkeiten mit GSM-R auftreten, die diesen Zustand ebenfalls offenbaren würden.

Das zweite Szenario beschreibt den Fall, dass der Triebfahrzeugführer den Zug mit der falschen Zugnummer registriert hat. Dies ist nach [RIL 481.0205] nur möglich, wenn sich zeitgleich kein weiterer Zug mit dieser Zugnummer registriert hat: *„Zugnummern müssen zum Erreichen bestimmter Züge eindeutig sein, d. h. sie dürfen zeitgleich im GSM-R-Netz nur einmal verwendet werden.“* Jedoch auch nach der Eingabe einer falschen Zugnummer ist der Zug weiterhin per Notruf erreichbar.

Damit es diesbezüglich zum Versagen der Ereigniskette kommt, müssen demnach für beide Szenarien mehrere einzelne Ereignisse versagen. Die Versagenswahrscheinlichkeiten für beide Szenarien liegen danach um mehrere Zehnerpotenzen unter der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik. Beide Szenarien werden daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

4.2.4 Das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter erhält die HOA-Alarmmeldung und nimmt diese wahr.“

Der redundante Teil der Alarmmeldungsübertragung zum Fahrdienstleiter beginnt mit 4. in Abbildung 40. Dem Fahrdienstleiter wird, wie bereits heute, die HOA-Alarmmeldung übermittelt. Er muss ebenfalls wie heute die HOA-Alarmmeldung wahrnehmen und deren Inhalt erfassen. Ist in der HOA-Alarmmeldung keine Zugnummer enthalten, kann der Fahrdienstleiter diese, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, nachträglich ermitteln.

Der Ablauf zu 4. in Abbildung 40 enthält daher folgende Versagenswahrscheinlichkeiten:

1. $f_{7_{Alarmwahrnehmung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung ($= 1 \cdot 10^{-3}$, Kapitel 3.2.2),
2. $f_{8_{Erfassen\ der\ HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters beim Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung ($= 1 \cdot 10^{-3}$, Kapitel 3.2.2),
3. $f_{4_{Zugnummernbereitstellung}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 ($= 5 \cdot 10^{-3}$, Formel 5),
4. $f_{5_{Zugnummernermittlung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Zugnummernermittlung bei einer HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummer ($= 1 \cdot 10^{-1}$, Kapitel 3.2.1).

4.2.5 Das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“

Der Ablauf zu 5. in Abbildung 40 wird nachfolgend erläutert. In 5a. hält der Triebfahrzeugführer nach erhaltener HOA-Alarmmeldung an der darin genannten 3H-Tafel an. Die diesbezügliche Versagenswahrscheinlichkeit lautet:

- $f_{39^{Tf} \text{ Halt an } 3H\text{-Tafel}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“ ($= \frac{2}{3} * 10^{-2}$, Formel 23).

In 5b. in Abbildung 40 nimmt der Fahrdienstleiter nach dem Erhalt und der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung sofort Kontakt über GSM-R zum Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges noch vor dessen Halt an der 3H-Tafel auf. Es ist davon auszugehen, dass die Zeitspanne zwischen dem Empfang der HOA-Alarmmeldung durch den Triebfahrzeugführer und den Fahrdienstleiter sowie dem Halt an der 3H-Tafel mehrere Minuten beträgt.

Der Fahrdienstleiter lässt sich den Inhalt der redundant erhaltenen HOA-Alarmmeldung vom Triebfahrzeugführer bestätigen. Der Abgleich der HOA-Alarmmeldung ist wie beim Zugmeldeverfahren nach [RIL 408.0221] mit einer konkreten Sprachvorgabe durchzuführen.

Ein Vorschlag für eine solche Sprachvorgabe, die in [RIL 408] aufzunehmen wäre, wird nachfolgend beschrieben:

Fahrdienstleiter des Stellortes:

- „Hier Fahrdienstleiter [Ort seines zuständigen Stellbereiches]! Triebfahrzeugführer [Zugnummer], nennen Sie den Inhalt der HOA-Alarmmeldung!“

Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges:

- „Hier Triebfahrzeugführer [Zugnummer]! Alarmart [Art des detektierten Alarms], 3H-Tafel [km xxx, yyy], detektierte Achse [Nummer der detektierten Achse], (ggf. Zugseite [links oder rechts])!“

Fahrdienstleiter des Stellortes:

- „Ich wiederhole: Zugnummer [Zugnummer], Alarmart [Art des detektierten Alarms], 3H-Tafel [km xxx, yyy], detektierte Achse [Nummer der detektierten Achse], (ggf. Zugseite [links oder rechts])!“

Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges:

- [„Richtig!“ / „Falsch!“ mit erneutem Durchlauf der Sprachvorgabe]

Um den Vergleich der HOA-Alarmmeldung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer zu ermöglichen, sind folgende Ereignisse erforderlich:

- „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ mit der Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters $f_{17}^{Fdl}_{GSM-R-Bedienung}$ ($= 1 * 10^{-3}$, Kapitel 3.2.3),
 - „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ mit der Versagenswahrscheinlichkeit der GSM-R-Technik $f_{11}^{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ ($= 7,9 * 10^{-4}$, Formel 8)
- bzw.:
- „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ mit der Versagenswahrscheinlichkeit der GSM-R-Technik $f_{12}^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}$ ($= 4,69 * 10^{-3}$, Formel 9),
- „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ mit der Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters $f_{44}^{Fdl}_{Abgleich HOA-Alarmmeldung}$,
 - „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ mit der Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers $f_{45}^{Tf}_{Abgleich HOA-Alarmmeldung}$.

Die Versagenswahrscheinlichkeiten $f_{44}^{Fdl}_{Abgleich HOA-Alarmmeldung}$ und $f_{45}^{Tf}_{Abgleich HOA-Alarmmeldung}$ beziehen sich auf fertigkeitsbasierende Handlungen. Das Vergleichen der HOA-Alarmmeldung verlangt vom Fahrdienstleiter und vom Triebfahrzeugführer lediglich das Vorlesen bzw. das Verstehen der HOA-Alarmmeldung. Es handelt sich um erlernte und häufig genutzte Fähigkeiten, die mit $f_{44}^{Fdl}_{Abgleich HOA-Alarmmeldung} = f_{45}^{Tf}_{Abgleich HOA-Alarmmeldung} = 1 * 10^{-3}$ zu quantifizieren sind. Versagt der Abgleich, wird zur sicheren Seite angenommen, dass dies zum Versagen der Ereigniskette führt, da hieraus u. a. ein Versagen des Haltens an der 3H-Tafel folgen kann. Es handelt sich hierbei um eine restriktive Annahme, die jedoch konsequent dem Vorgehen gemäß Abbildung 6 folgt.

Der Fahrdienstleiter des Stellortes und der Triebfahrzeugführer des detektierten Zuges halten die fernmündliche Verbindung aufrecht, bis der Triebfahrzeugführer dem Fahrdienstleiter den Halt an der 3H-Tafel fernmündlich bestätigt hat. Fahrdienstleiter verfügen häufig über gute Ortskenntnisse in ihrem Stellbereich. Sie können daher bei Bedarf dem Triebfahrzeugführer Hilfestellungen beim Auffinden der 3H-Tafel geben. Dies kann beispielsweise durch die Nennung von im Umfeld der 3H-Tafel befindlichen markanten Punkten geschehen, wie z. B. Bahnübergängen, Eisenbahnüberführungen oder -unterführungen. Darüber hinaus könnten in die Örtlichen Richtlinien derartige Informationen im Zusammenhang mit 3H-Tafeln aufgenommen werden. Der Fahrdienstleiter des Stellortes trägt die Bestätigung des Haltes an der 3H-Tafel mit Zugnummer, Datum und Uhrzeit in eine hierfür zu schaffende betriebliche Unterlage ein.

Es ist nicht auszuschließen, dass die Triebfahrzeugführer bei der Zielbremsung zur 3H-Tafel und gleichzeitigem Abgleich der HOA-Alarmmeldung mit dem Fahrdienstleiter überfordert sind. Wenn praktische Erfahrungen dies bestätigen sollten, könnte ein Abgleich der HOA-Alarmmeldung nach dem Halt an der 3H-Tafel erfolgen. In diesem Fall würden beide Personale vor dem Halt an der 3H-Tafel nur sicherstellen, dass der Triebfahrzeugführer den Standort der 3H-Tafel korrekt erfasst hat.

Es soll im Regelfall ausgeschlossen werden, dass der Fahrdienstleiter den Triebfahrzeugführer zum Abgleich der HOA-Alarmmeldung anruft, bevor die Kommunikationseinheit dem Triebfahrzeugführer die HOA-Alarmmeldung übermittelt hat. Hierzu kann in der Konfiguration des Systems MAS 90 eine kurze Verzögerung für das Erscheinen der HOA-Alarmmeldung beim Fahrdienstleiter vorgesehen werden. Die diesbezüglich korrekte Konfiguration des Systems MAS 90 sollte vorgeschrieben und bei der Abnahme der HOA und bei Instandhaltungsarbeiten geprüft werden.

Die Versagenswahrscheinlichkeit für den redundanten Informationsweg über den Fahrdienstleiter (4. und 5b. Abbildung 40) wird auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen wie folgt berechnet:

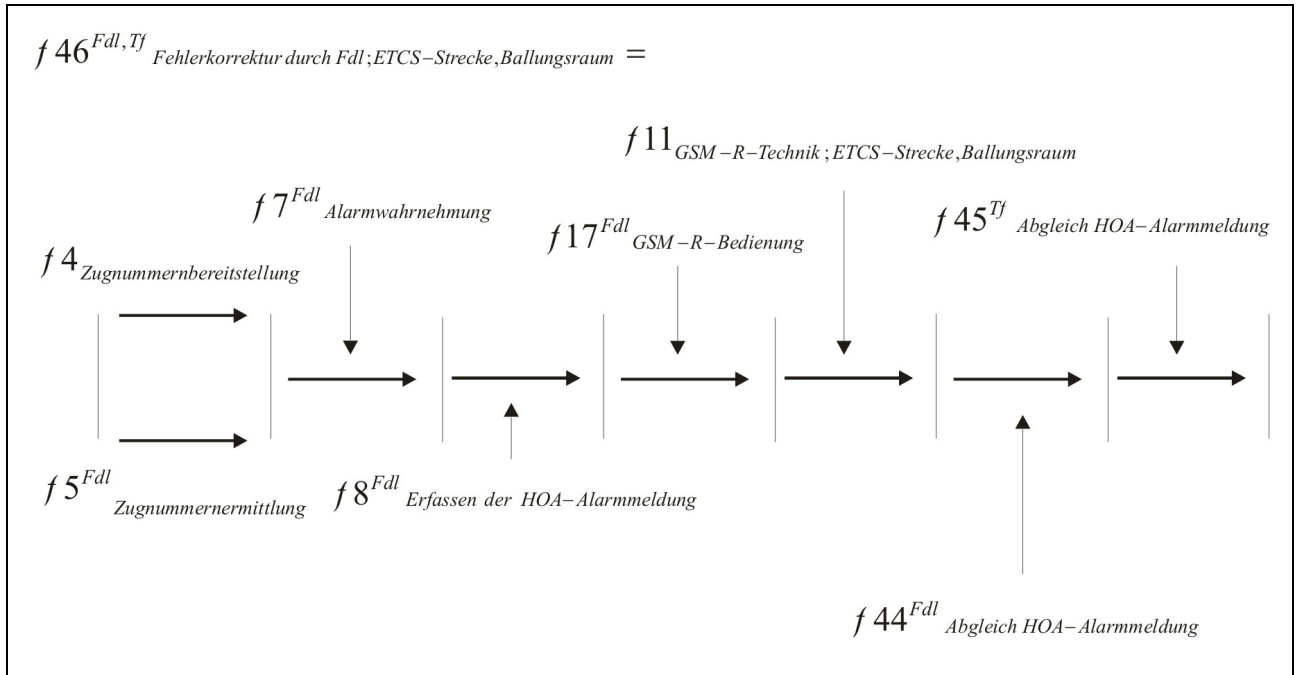


Abbildung 41: Pfeildarstellung der Formel 27

Formel 27

$$\begin{aligned}
 f 46^{Fdl, Tf} \text{ Fehlerkorrektur durch Fdl; ETCS-Strecke, Ballungsraum} &= \\
 (f 4_{\text{Zugnummernbereitstellung}} * f 5^{Fdl}_{\text{Zugnummernermittlung}}) &+ \\
 f 7^{Fdl}_{\text{Alarmwahrnehmung}} + f 8^{Fdl}_{\text{Erfassen der HOA-Alarmmeldung}} + f 17^{Fdl}_{\text{GSM-R-Bedienung}} &+ \\
 f 11_{\text{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + f 44^{Fdl}_{\text{Abgleich HOA-Alarmmeldung}} + f 45^{Tf}_{\text{Abgleich HOA-Alarmmeldung}} &= \\
 = ((5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-1})) + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 7,9 * 10^{-4} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} &= \\
 = 6,29 * 10^{-3} &
 \end{aligned}$$

mit:

- $f 46^{Fdl, Tf}$ Fehlerkorrektur durch Fdl; ETCS-Strecke, Ballungsraum = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter informiert den Triebfahrzeugführer über die korrekte HOA-Alarmmeldung, wenn der Triebfahrzeugführer diese nicht erhalten oder nicht korrekt wahrgenommen hat auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ (4. und 5b. Abbildung 40),
- $f 4_{\text{Zugnummernbereitstellung}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 (Formel 5 und Formel 6),
- $f 5^{Fdl}_{\text{Zugnummernermittlung}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Zugnummernermittlung bei einer HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummer (Kapitel 3.2.1 und Formel 6),

- $f7^{Fdl}$ *Alarmwahrnehmung* = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f8^{Fdl}$ *Erfassen der HOA-Alarmmeldung* = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters beim Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f17^{Fdl}$ *GSM-R-Bedienung* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f11^{GSM-R-Technik ; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 8),
- $f44^{Fdl}$ *Abgleich HOA-Alarmmeldung* = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ (Kapitel 4.2.5),
- $f45^{Tf}$ *Abgleich HOA-Alarmmeldung* = Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ (Kapitel 4.2.5).

Für sonstige Strecken ergibt sich:

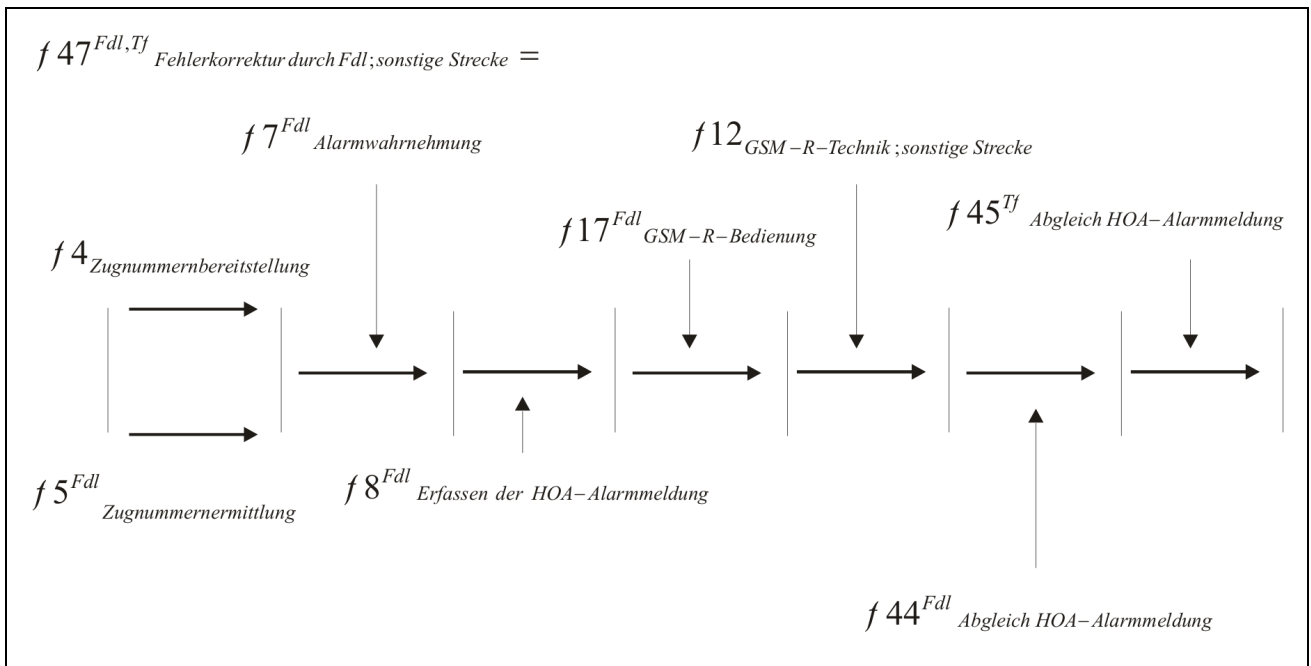


Abbildung 42: Pfeildarstellung der Formel 28

Formel 28

$$\begin{aligned}
& f_{47}^{Fdl, Tf} \text{ Fehlerkorrektur durch Fdl; sonstige Strecke} = \\
& (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl} + \\
& f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} + f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{12 \text{ GSM-R-Technik; sonstige Strecke}} + \\
& f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} + f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Tf} = \\
& = ((5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-1})) + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 4,69 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} + 1 * 10^{-3} \\
& = 1,02 * 10^{-2}
\end{aligned}$$

mit:

- $f_{47}^{Fdl, Tf} \text{ Fehlerkorrektur durch Fdl; sonstige Strecke}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter informiert den Triebfahrzeugführer über die korrekte HOA-Alarmmeldung, wenn der Triebfahrzeugführer diese nicht erhalten oder nicht korrekt wahrgenommen hat auf sonstigen Strecken.“ (4. und 5b. Abbildung 40),
- $f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 (Formel 5 und Formel 6),
- $f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Zugnummernermittlung bei einer HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummer (Kapitel 3.2.1 und Formel 6),
- $f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters beim Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2),
- $f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f_{12 \text{ GSM-R-Technik; sonstige Strecke}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken (hier zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 9),
- $f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ (Kapitel 4.2.5),

- f_{45}^{Tf} Abgleich HOA-Alarmmeldung = Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ (Kapitel 4.2.5).

Für den Triebfahrzeugführer ergeben sich im redundanten Teil der Ereigniskette folgende Versagenswahrscheinlichkeiten auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (2., 3. und 5a. in Abbildung 40):

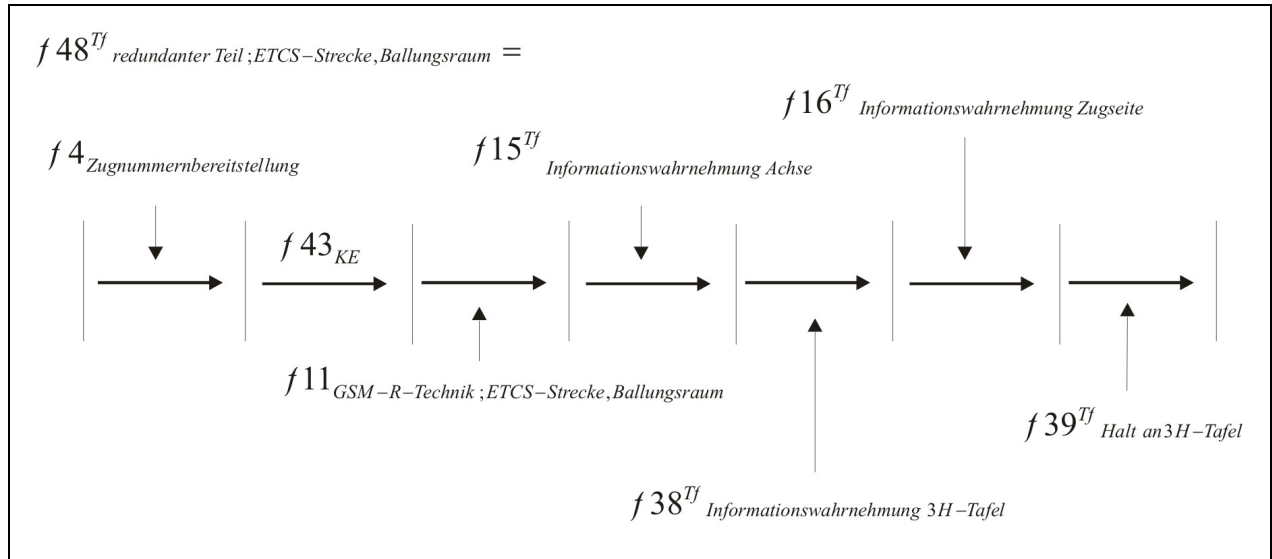


Abbildung 43: Pfeildarstellung der Formel 29

Formel 29

$$\begin{aligned}
 f_{48}^{Tf} \text{ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum} &= \\
 f_4 \text{ Zugnummernbereitstellung} &+ f_{43_{KE}} + f_{11_{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + f_{15}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse} + \\
 f_{38}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel} &+ f_{16}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite} + f_{39}^{Tf} \text{ Halt an 3H-Tafel} \\
 &= 5 \cdot 10^{-3} + 2,5 \cdot 10^{-3} + 7,9 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-3} + \frac{5}{3} \cdot 10^{-4} + \frac{2}{3} \cdot 10^{-2} \\
 &= 1,66 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- f_{48}^{Tf} redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum = Versagenswahrscheinlichkeit des redundanten Teils der Ereigniskette mit direkter HOA-Alarmmeldungsübertragung zum Triebfahrzeugführer (2., 3. und 5a. in Abbildung 40) auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen,
- $f_4 \text{ Zugnummernbereitstellung}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 (Formel 5),
- $f_{43_{KE}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Kommunikationseinheit (Kapitel 4.2.2),

- $f_{11}^{Tf}_{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung im Bereich von Ballungsräumen bzw. auf Strecken mit ETCS (hier zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 8),
- $f_{15}^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Achse}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f_{38}^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ 3H-Tafel}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig.“ (Kapitel 4.1.2),
- $f_{16}^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Zugseite}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (Formel 11),
- $f_{39}^{Tf}_{Halt\ an\ 3H-Tafel}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“ (Formel 23).

Die Summanden in Formel 29 sind die Versagenswahrscheinlichkeiten derjenigen Ereignisse, die durch den Fahrdienstleiter bei erfolgreichem Bewältigen der Abläufe 4. und 5b. in Abbildung 40 korrigiert werden können. Dies gilt jedoch nicht für $f_{11}^{Tf}_{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}$, da diese Versagenswahrscheinlichkeit auch im redundanten Abschnitt, in dem der Fahrdienstleiter eingebunden wird, enthalten ist.

Für den Triebfahrzeugführer ergeben sich auf sonstigen Strecken im redundanten Teil der Ereigniskette folgende Versagenswahrscheinlichkeiten:

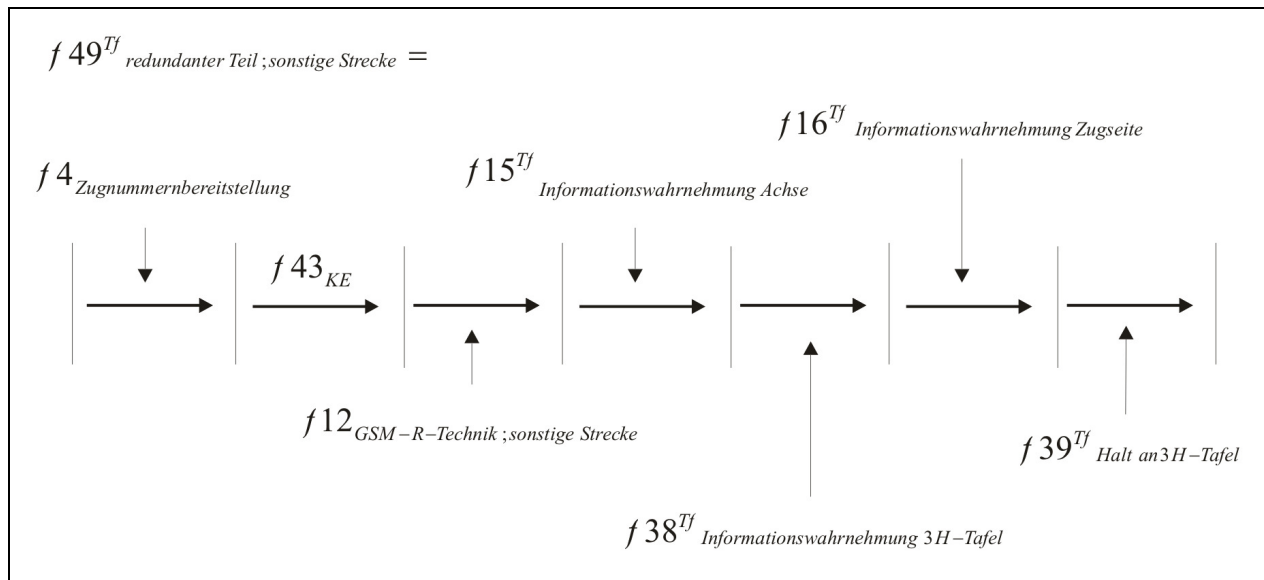


Abbildung 44: Pfeildarstellung der Formel 30

Formel 30

$$\begin{aligned}
& f_{49}^{Tf} \text{ redundanter Teil; sonstige Strecke} = \\
& f_{4}^{Zugnummernbereitstellung} + f_{43}^{KE} + f_{12}^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke} + f_{15}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse} + \\
& f_{38}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel} + f_{16}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite} + f_{39}^{Tf} \text{ Halt an 3H-Tafel} \\
& = 5 * 10^{-3} + 2,5 * 10^{-3} + 4,69 * 10^{-3} + 5 * 10^{-4} + 1 * 10^{-3} + \frac{5}{3} * 10^{-4} + \frac{2}{3} * 10^{-2} \\
& = 2,05 * 10^{-2}
\end{aligned}$$

mit:

- $f_{49}^{Tf} \text{ redundanter Teil; sonstige Strecke}$ = Versagenswahrscheinlichkeit des redundanten Teils der Ereigniskette mit direkter HOA-Alarmmeldungsübertragung zum Triebfahrzeugführer (2., 3. und 5a. in Abbildung 40) auf sonstigen Strecken,
- $f_{4}^{Zugnummernbereitstellung}$ = Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 (Formel 5),
- f_{43}^{KE} = Versagenswahrscheinlichkeit der Kommunikationseinheit (Kapitel 4.2.2),
- $f_{12}^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken (hier zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer).“ (Formel 9),
- $f_{15}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (Kapitel 3.2.3),
- $f_{38}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig.“ (Kapitel 4.1.2),
- $f_{16}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (Formel 11),
- $f_{39}^{Tf} \text{ Halt an 3H-Tafel}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“ (Formel 23).

Damit der redundante Teil der Ereigniskette versagt, müssen beide redundanten Wege, d. h. 2., 3., 5a. sowie 4., 5b. (siehe Abbildung 40) versagen.

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{50}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ für den redundanten Teil der Ereigniskette auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (2. bis 5b. in Abbildung 40) berechnet sich durch die UND-Verknüpfung der quantifizierten Ereignisse in Formel 27 und Formel 29 wie folgt:

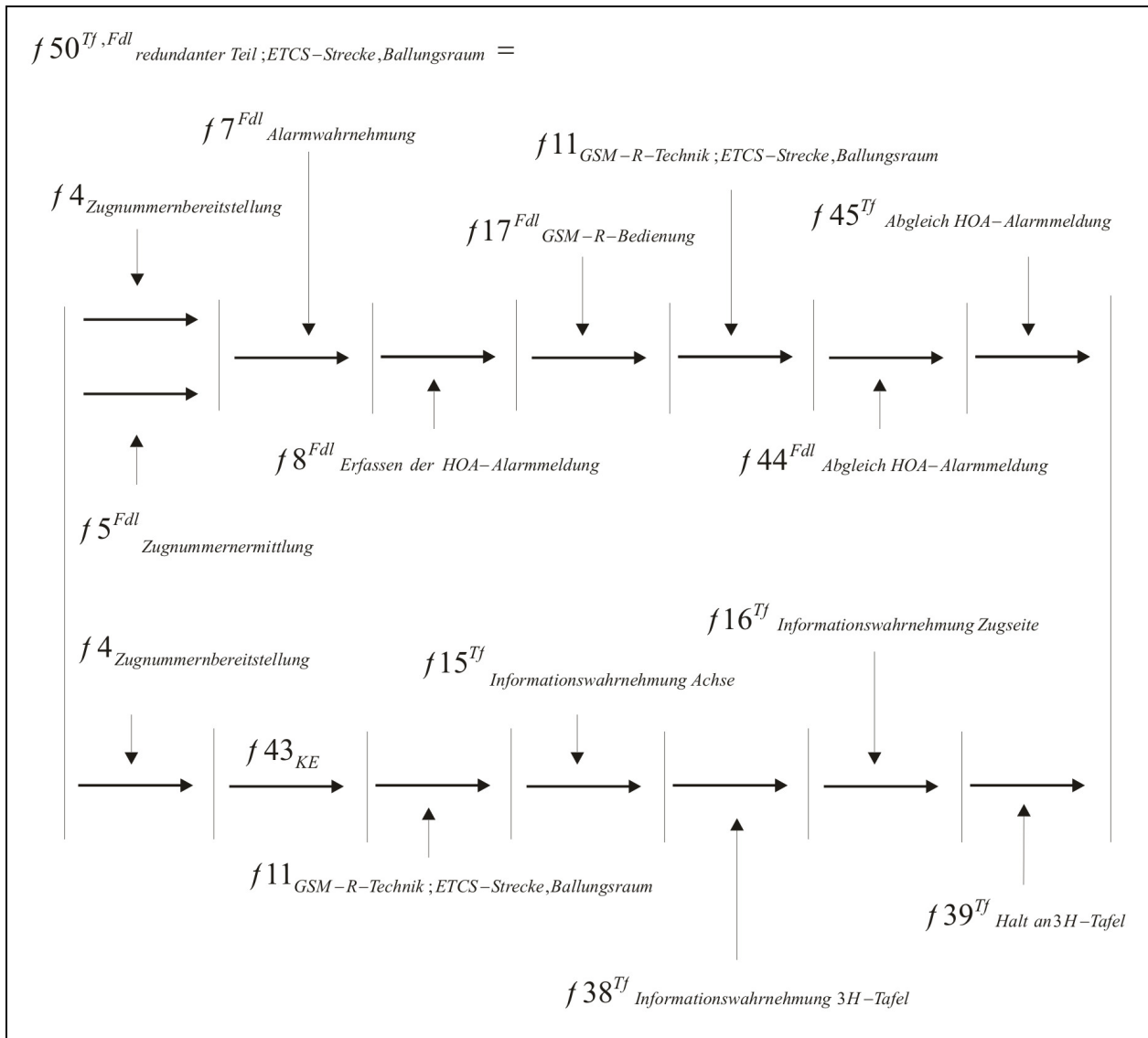


Abbildung 45: Pfeildarstellung der Formel 31, wobei die Versagenswahrscheinlichkeit $f 11_{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ (Formel 8) im unteren Pfad die Verbindung zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer betrifft. Im oberen Pfad bezieht sich $f 11_{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ auf die fernmündliche Verbindung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer.

Formel 31

$$\begin{aligned}
& f_{50}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil ; ETCS-Strecke, Ballungsraum} = \\
& (f_{4}^{Tf} \text{ Zugnummernbereitstellung} + f_{43}^{KE} + f_{11}^{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum} + f_{15}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Achse} \\
& + f_{38}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel} + f_{16}^{Tf} \text{ Informationswahrnehmung Zugseite} + f_{39}^{Tf} \text{ Halt an 3H-Tafel}) \\
& * \\
& ((f_{4}^{Tf} \text{ Zugnummernbereitstellung} * f_{5}^{Fdl} \text{ Zugnummernermittlung}) + f_{7}^{Fdl} \text{ Alarmwahrnehmung} + f_{8}^{Fdl} \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung} + \\
& f_{17}^{Fdl} \text{ GSM-R-Bedienung} + f_{11}^{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum} + f_{44}^{Fdl} \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung} + \\
& f_{45}^{Tf} \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung})
\end{aligned}$$

mit:

- den Bedeutungen der Formelzeichen in Formel 31, die aus Formel 27 und Formel 29 entnommen werden können.

Die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{51}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil ; sonstige Strecke}$ für den redundanten Teil der Ereigniskette (2. bis 5b. in Abbildung 40) auf sonstigen Strecken berechnet sich durch die UND-Verknüpfung der quantifizierten Ereignisse in Formel 28 und Formel 30 gemäß:

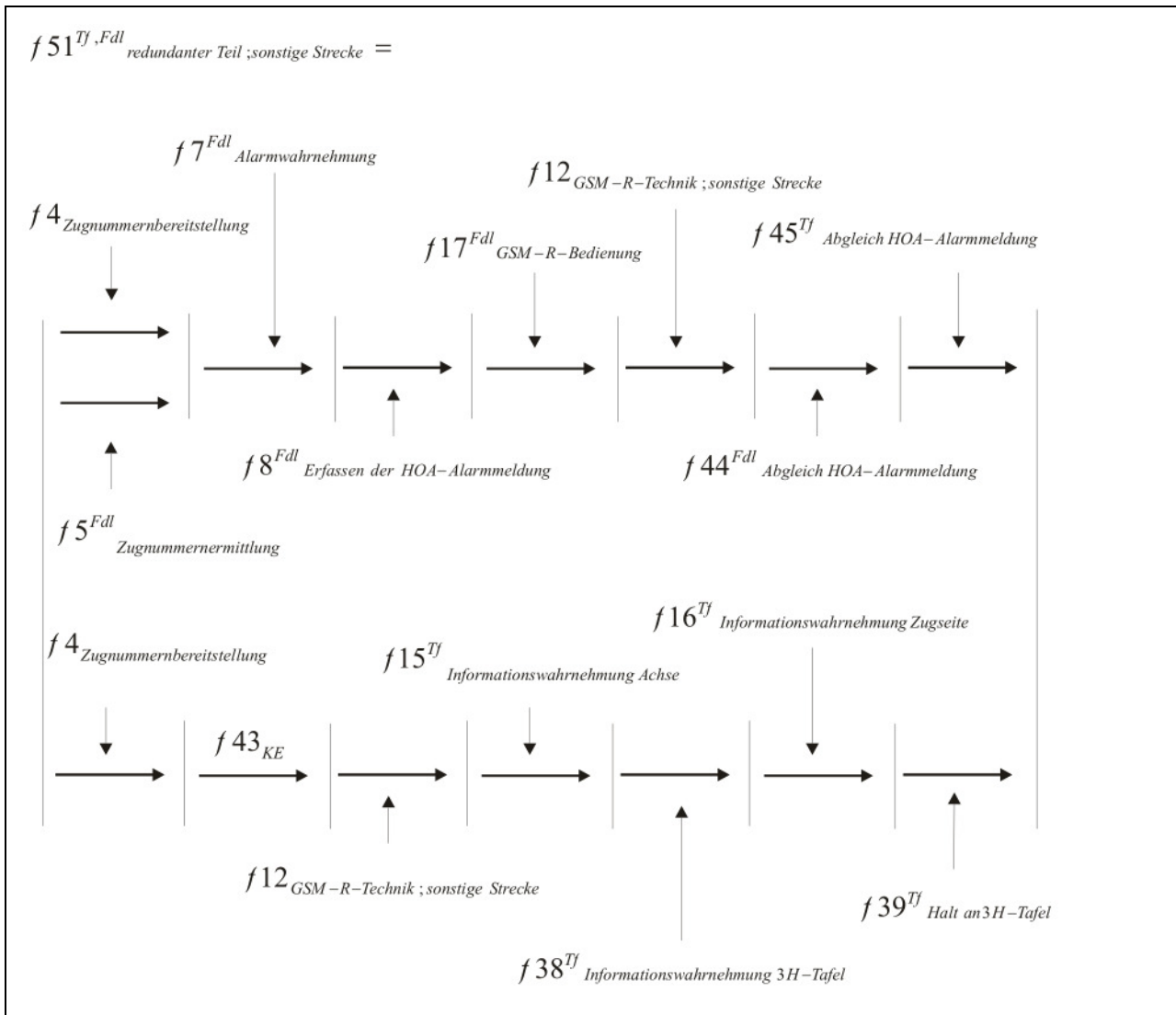


Abbildung 46: Pfeildarstellung der Formel 32, wobei die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{12}^{GSM-R-Technik ;sonstige Strecke}$ (Formel 9) für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken.“ im unteren Pfad die Verbindung zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer betrifft. Im oberen Pfad bezieht sich $f_{12}^{GSM-R-Technik ;sonstige Strecke}$ auf die fernmündliche Verbindung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer.

Formel 32

$$\begin{aligned}
& f_{51}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil; sonstige Strecke} = \\
& (f_{4}^{\text{Zugnummernbereitstellung}} + f_{43}^{\text{KE}} + f_{12}^{\text{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}} + f_{15}^{\text{Informationswahrnehmung Achse}} \\
& + f_{38}^{\text{Informationswahrnehmung 3H-Tafel}} + f_{16}^{\text{Informationswahrnehmung Zugseite}} + f_{39}^{\text{Halt an 3H-Tafel}}) \\
& * \\
& ((f_{4}^{\text{Zugnummernbereitstellung}} * f_{5}^{\text{Zugnummernermittlung}}) + f_{7}^{\text{Alarmwahrnehmung}} + f_{8}^{\text{Erfassen der HOA-Alarmmeldung}} + \\
& f_{17}^{\text{GSM-R-Bedienung}} + f_{12}^{\text{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}} + f_{44}^{\text{Abgleich HOA-Alarmmeldung}} + \\
& f_{45}^{\text{Abgleich HOA-Alarmmeldung}})
\end{aligned}$$

mit:

- den Bedeutungen der Formelzeichen in Formel 32, die aus Formel 28 und Formel 30 entnommen werden können.

Um die Versagenswahrscheinlichkeiten $f_{50}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ und $f_{51}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil; sonstige Strecke}$ errechnen zu können, ist ein Exkurs in die Boolesche Algebra notwendig.

Es sei F die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit einer Ereigniskette. Die Ereigniskette soll versagen, wenn die Ereignisse (A ODER B) UND (A ODER C) versagen. Die diesbezügliche Gleichung und die zugehörige Pfeildarstellung sind in Formel 33 und in Abbildung 47 enthalten. Den drei Ereignissen werden folgende Versagenswahrscheinlichkeiten zugewiesen: $f_A = 1 * 10^{-3}$, $f_B = 2 * 10^{-3}$, $f_C = 3 * 10^{-3}$.

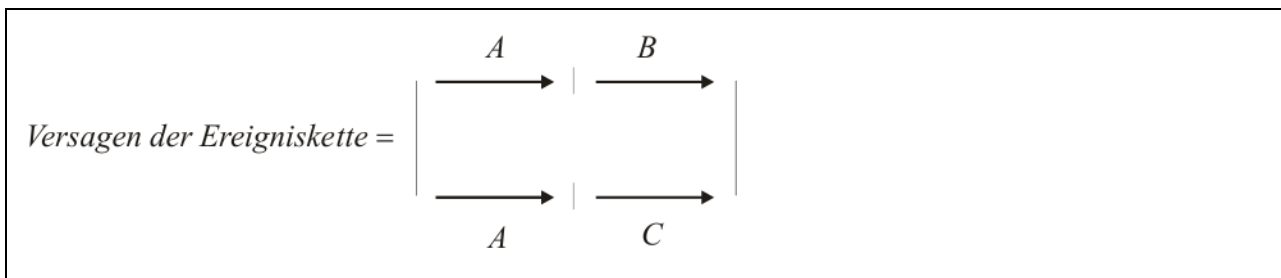


Abbildung 47: Pfeildarstellung der Formel 33

Es gilt:

Formel 33

$$\text{Versagen der Ereigniskette} = (A + B) * (A + C).$$

Nach [Nasa 2002] und [BRA 2005] gilt für die Boolesche Algebra das Distributivgesetz $X \bullet (Y+Z) = X \bullet Y + X \bullet Z$. Dieses angewendet auf Formel 33 ergibt:

Formel 34

$$\text{Versagen der Ereigniskette} = A * A + A * C + B * A + B * C.$$

Nach [NASA 2002] gilt für die Boolesche Algebra ebenfalls das Idempotenzgesetz $X \bullet X = X$. Daraus folgt:

Formel 35

$$\text{Versagen der Ereigniskette} = A + A * C + B * A + B * C$$

Zu berücksichtigen ist ebenfalls, dass das Auftreten von A bereits zum Versagen der Ereigniskette führt. Daher ist es unerheblich, mit welchen weiteren Ereignissen A auftritt. Dieses Vorgehen wird in [BRA 2005] als Absorption bezeichnet. Formel 35 wird daher wie folgt verändert:

Formel 36

$$\text{Versagen der Ereigniskette} = A + B * C.$$

Hinsichtlich der Berechnung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit F ergibt sich:

Formel 37

$$F = f_A + f_B * f_C = 1 * 10^{-3} + (2 * 10^{-3}) * (3 * 10^{-3}) = 1,006 * 10^{-3}.$$

Würde fehlerhafterweise auf der Grundlage der Formel 33 der Wert für F berechnet, würde man $F = (f_A + f_B) * (f_A + f_C) = 1,2 * 10^{-5}$ erhalten und somit eine erheblich zu niedrige Gesamtversagenswahrscheinlichkeit. Dies ist bei der Berechnung von $f_{50}^{Tf, Fdl}$ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum und $f_{51}^{Tf, Fdl}$ redundanter Teil; sonstige Strecke zu beachten. Grund hierfür ist, dass in Formel 31 und Formel 32 sowohl die Wahrscheinlichkeit $f_{4}^{Zugnummernbereitstellung}$ zweifach vorkommt wie auch $f_{11}^{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}$ auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen sowie $f_{12}^{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}$ auf sonstigen Strecken. Dieses Vorkommen erfolgt je einmal in jedem der beiden durch die UND-Verknüpfung verbundenen Terme der jeweiligen Gleichung.

Der Regel $X \bullet (Y+Z) = X \bullet Y + X \bullet Z$ folgend ergibt sich hinsichtlich der Quantifizierung aus Formel 31 die Formel 38:

Formel 38

$$\begin{aligned}
& f_{50}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum} = \\
& f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} \\
& * f_{7 \text{ Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} \\
& * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
& + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Tf} \\
& + f_{43 \text{ KE}} * (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{43 \text{ KE}} * f_{7 \text{ Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{43 \text{ KE}} \\
& * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{43 \text{ KE}} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{43 \text{ KE}} * f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
& + f_{43 \text{ KE}} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{43 \text{ KE}} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Tf} \\
& + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} * (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) \\
& + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} * f_{7 \text{ Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
& * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} \\
& + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} * f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
& + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
& * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Tf} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} \\
& * f_{7 \text{ Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} \\
& * f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Tf} + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} \\
& * (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} \\
& * f_{7 \text{ Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} \\
& * f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Tf} + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} \\
& * (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} \\
& * f_{7 \text{ Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} \\
& * f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Tf} \\
& + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{7 \text{ Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} \\
& + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Fdl} \\
& + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmpflicht}}^{Tf}
\end{aligned}$$

Nach Anwendung des Distributiv-Gesetzes der Booleschen Algebra und anschließender Quantifizierung in Formel 38 fällt auf, dass in zwei Produkten gleiche Faktoren enthalten sind. Dies betrifft die Produkte:

- $f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}} * (f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}} * f5^{\text{Fdl}}_{\text{Zugnummernermittlung}})$ und
- $f11_{\text{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}} * f11_{\text{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}}$

Nach Anwendung des Idempotenzgesetzes verändern sich beide Produkte in:

- $f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}} * f5^{\text{Fdl}}_{\text{Zugnummernermittlung}}$ und
- $f11_{\text{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}}$

Beide Terme:

- $f4_{\text{Zugnummernbereitstellung}} * f5^{\text{Fdl}}_{\text{Zugnummernermittlung}}$ und
- $f11_{\text{GSM-R-Technik;ETCS-Strecke,Ballungsraum}}$

werden einmal berücksichtigt und alle Produkte mit diesen Faktoren eliminiert analog des Rechenschrittes von Formel 35 zu Formel 37. Formel 38 verändert sich dementsprechend wie folgt:

Formel 39

$$\begin{aligned}
& f_{50}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum} = \\
& (f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{5 \text{ Zugnummernermittlung}}^{Fdl}) + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl} \\
& + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} \\
& + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} + f_{4 \text{ Zugnummernbereitstellung}} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Tf} \\
& + f_{43 \text{ KE}} * f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl} + f_{43 \text{ KE}} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{43 \text{ KE}} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{43 \text{ KE}} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{43 \text{ KE}} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Tf} \\
& + f_{11 \text{ GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{15 \text{ Informationswahrnehmung Achse}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Tf} \\
& + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl} \\
& + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} \\
& + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{38 \text{ Informationswahrnehmung 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Tf} \\
& + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl} \\
& + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} \\
& + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{16 \text{ Informationswahrnehmung Zugseite}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Tf} \\
& + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{7 \text{ Alarmwahrnehmung}}^{Fdl} + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{8 \text{ Erfassen der HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{17 \text{ GSM-R-Bedienung}}^{Fdl} + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{44 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Fdl} \\
& + f_{39 \text{ Halt an 3H-Tafel}}^{Tf} * f_{45 \text{ Abgleich HOA-Alarmmeldung}}^{Tf}
\end{aligned}$$

Setzt man in die Formel 39 die zugehörigen Zahlenwerte ein, ergibt sich für

$$f_{50}^{Tf, Fdl} \text{ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum} :$$

Formel 40

$$\begin{aligned}
& f50^{Tf, Fdl}_{\text{redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} = \\
& ((5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-1})) \\
& + (5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (2,5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (2,5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (2,5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (2,5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (2,5 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + 7,9 * 10^{-4} \\
& + (5 * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) + (5 * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) + (5 * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) + (5 * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (5 * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (1 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (1 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (1 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) + (1 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (1 * 10^{-3}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (\frac{5}{3} * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) + (\frac{5}{3} * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) + (\frac{5}{3} * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) + (\frac{5}{3} * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (\frac{5}{3} * 10^{-4}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (\frac{2}{3} * 10^{-2}) * (1 * 10^{-3}) + (\frac{2}{3} * 10^{-2}) * (1 * 10^{-3}) + (\frac{2}{3} * 10^{-2}) * (1 * 10^{-3}) + (\frac{2}{3} * 10^{-2}) * (1 * 10^{-3}) \\
& + (\frac{2}{3} * 10^{-2}) * (1 * 10^{-3}) \\
& = 1,37 * 10^{-3}
\end{aligned}$$

mit:

- $f50^{Tf, Fdl}_{\text{redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für den redundanten Teil der Ereigniskette (2. bis 5b. in Abbildung 40) auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.

Für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit für den redundanten Teil der Ereigniskette (2. bis 5b. in Abbildung 40) auf sonstigen Strecken $f51^{Tf, Fdl}_{\text{redundanter Teil; sonstige Strecke}}$ werden Formel 39 und Formel 40 genutzt. Jedoch wird $f11_{GSM-R\text{-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} = 7,9 * 10^{-4}$ durch $f12_{GSM-R\text{-Technik; sonstige Strecke}} = 4,68 * 10^{-3}$ ersetzt. Es ergibt sich $f51^{Tf, Fdl}_{\text{redundanter Teil; sonstige Strecke}} = 5,27 * 10^{-3}$.

4.2.6 Das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse mit mehrfacher Abhörmöglichkeit der HOA-Alarmmeldung durch die Kommunikationseinheit.“

Im Unterschied zur Stellung von Zügen mit HOA-detektiertem Heißläufer nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik steht dem Triebfahrzeugführer bei den in Kapitel 4.2 untersuchten Ereignisketten die Möglichkeit des mehrfachen Abhörens der HOA-Alarmmeldung über die

Kommunikationseinheit zur Verfügung. Ob sich durch die zusätzliche Abhörmöglichkeit der HOA-Alarmmeldung über die Kommunikationseinheit eine quantifizierbare Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit gegenüber dem heutigen Identifizieren der detektierten Achse ergibt, wird nachfolgend diskutiert.

Der Triebfahrzeugführer kann bei Bedarf zwar bereits derzeit durch die Nutzung von GSM-R- oder GSM-Endgeräten den Fahrdienstleiter erneut um die Nennung der HOA-Alarmmeldung bitten. Da ein HOA-detektierter Zug durch einen längeren Halt am Stellsignal, insbesondere auf hoch belasteten Strecken, erhebliche Stauwirkungen verursacht, muss beim Fahrdienstleiter, in dessen Stellbereich sich das Stellsignal befindet, mit einem überdurchschnittlichen fernmündlichen Gesprächsaufkommen gerechnet werden. Es ist anzunehmen, dass die Triebfahrzeugführer, deren Züge durch den Halt des HOA-detektierten Zuges ebenfalls angehalten werden sowie Zugdisponenten, benachbarte Fahrdienstleiter usw. um Informationen bitten werden und zwar bei dem Fahrdienstleiter, in dessen Stellbereich sich das Stellsignal befindet.

Daher kann derzeit nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass der Triebfahrzeugführer des HOA-detektierten Zuges den zuständigen Fahrdienstleiter im Bedarfsfall erreicht. Es ist anzunehmen, dass die neu zur Verfügung stehende Kommunikationseinheit stressmindernd wirkt. Ein mehrfaches erfolgloses Anrufen des Triebfahrzeugführers beim Fahrdienstleiter des Stellsignals kann vermieden werden.

Der Wert aus $f_{28}^{Tf} \text{ Identifikation Achse} = 1 \cdot 10^{-3}$ (Kapitel 3.2.5) für die regelbasierende Handlung unter Stresseinwirkung reduziert sich auf eine regelbasierende Handlung ohne Stresseinwirkung mit $f_{52}^{Tf} \text{ Identifikation Achse mit KE} = 5 \cdot 10^{-4}$.

4.2.7 Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zum Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ bei der Stellung des HOA-detektierten Zuges an der 3H-Tafel

Die Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ $f_{29}^{Tf} \text{ Aussetzen} = 1 \cdot 10^{-3}$ (Kapitel 3.2.6) ändert sich durch die Stellung an der 3H-Tafel und durch das Vorhandensein der Kommunikationseinheit nicht. Dies ist nachvollziehbar, da die Art der Stellung des HOA-detektierten Zuges wie auch die Kommunikationseinheit keinen Einfluss auf das Versagen des Triebfahrzeugführers beim Aussetzen des schadhaften Fahrzeuges haben.

4.2.8 Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer

Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F53_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (1. bis 7. in Abbildung 40) wird berechnet nach:

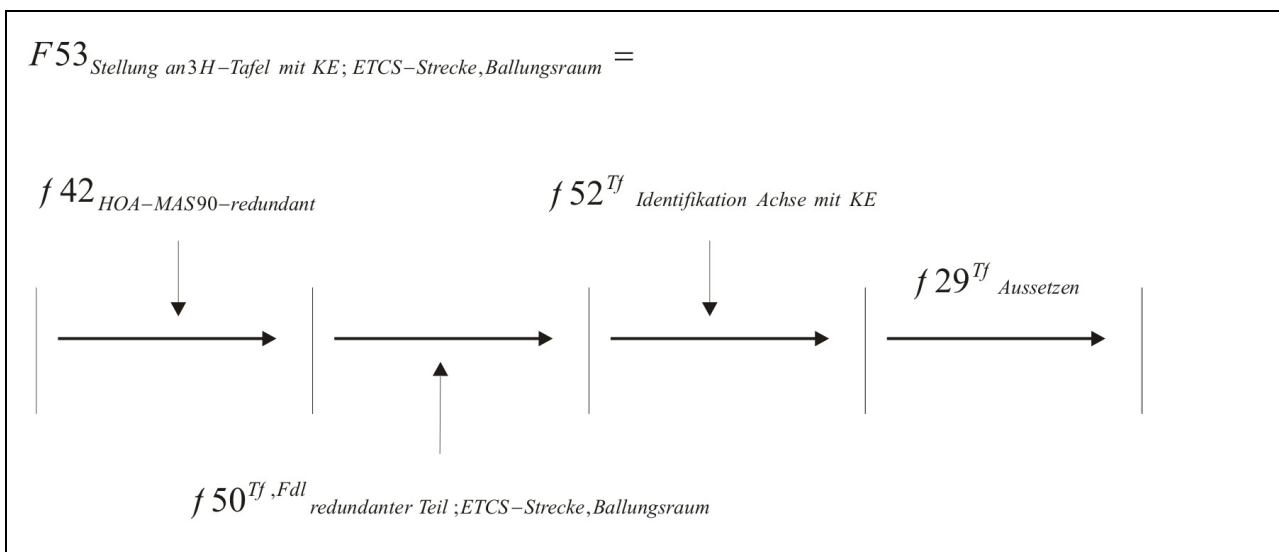


Abbildung 48: Pfeildarstellung der Formel 41, wobei $f42_{\text{HOA-MAS90-redundant}}$ die Versagenswahrscheinlichkeit zu 1., $f50^{\text{Tf}, \text{Fdl}}$ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum die Versagenswahrscheinlichkeit zu 2. bis 5b., $f52^{\text{Tf}}$ Identifikation Achse mit KE die Versagenswahrscheinlichkeit zu 6. und $f29^{\text{Tf}}$ Aussetzen die Versagenswahrscheinlichkeit zu 7. in Abbildung 40 beinhalten.

Formel 41

$$\begin{aligned}
 F53_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} &= \\
 &f42_{\text{HOA-MAS90-redundant}} + f50^{\text{Tf}, \text{Fdl}}_{\text{redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} + f52^{\text{Tf}}_{\text{Identifikation Achse mit KE}} + \\
 &f29^{\text{Tf}}_{\text{Aussetzen}} \\
 &= 7,5 \cdot 10^{-3} + 1,37 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-3} \\
 &= 1,04 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- $f_{42}^{HOA-MAS90-redundant}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen an das System MAS 90“ (Formel 26),
- $f_{50}^{Tf, Fdl}$ *redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum* = Versagenswahrscheinlichkeit für den redundanten Teil der Ereigniskette (2. bis 5b. in Abbildung 40) auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (Formel 40),
- f_{52}^{Tf} *Identifikation Achse mit KE* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse mit mehrfacher Abhörmöglichkeit der HOA-Alarmmeldung durch die Kommunikationseinheit.“ (Kapitel 4.2.6),
- f_{29}^{Tf} *Aussetzen* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

Die nachfolgende Abbildung 49 enthält den Fehlerbaum mit F_{53} *Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum*, berechnet mithilfe der Näherung. Wird F_{53} *Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum* mit der exakten Gleichung berechnet, ergibt sich der Wert 0,01033. Der Wert der Näherung und der exakten Berechnung unterscheiden sich um ca. 0,7 %, sodass die Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ auch diesbezüglich eine gute Näherung darstellt.

Ergänzend zu den Ausführungen in Kapitel 3.2.8 zeigt sich anhand des Fehlerbaums in Abbildung 49 ein weiteres Mal die Notwendigkeit, die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten sowohl mithilfe von Formeln und der Pfeildarstellung nach Hinzen zu berechnen, wie auch mithilfe von Fehlerbäumen. Denn in Fehlerbäumen können komplexere Berechnungsvorgänge, z. B. Absorptionen wie im Berechnungsschritt von Formel 35 zu Formel 36, nicht gezeigt werden.

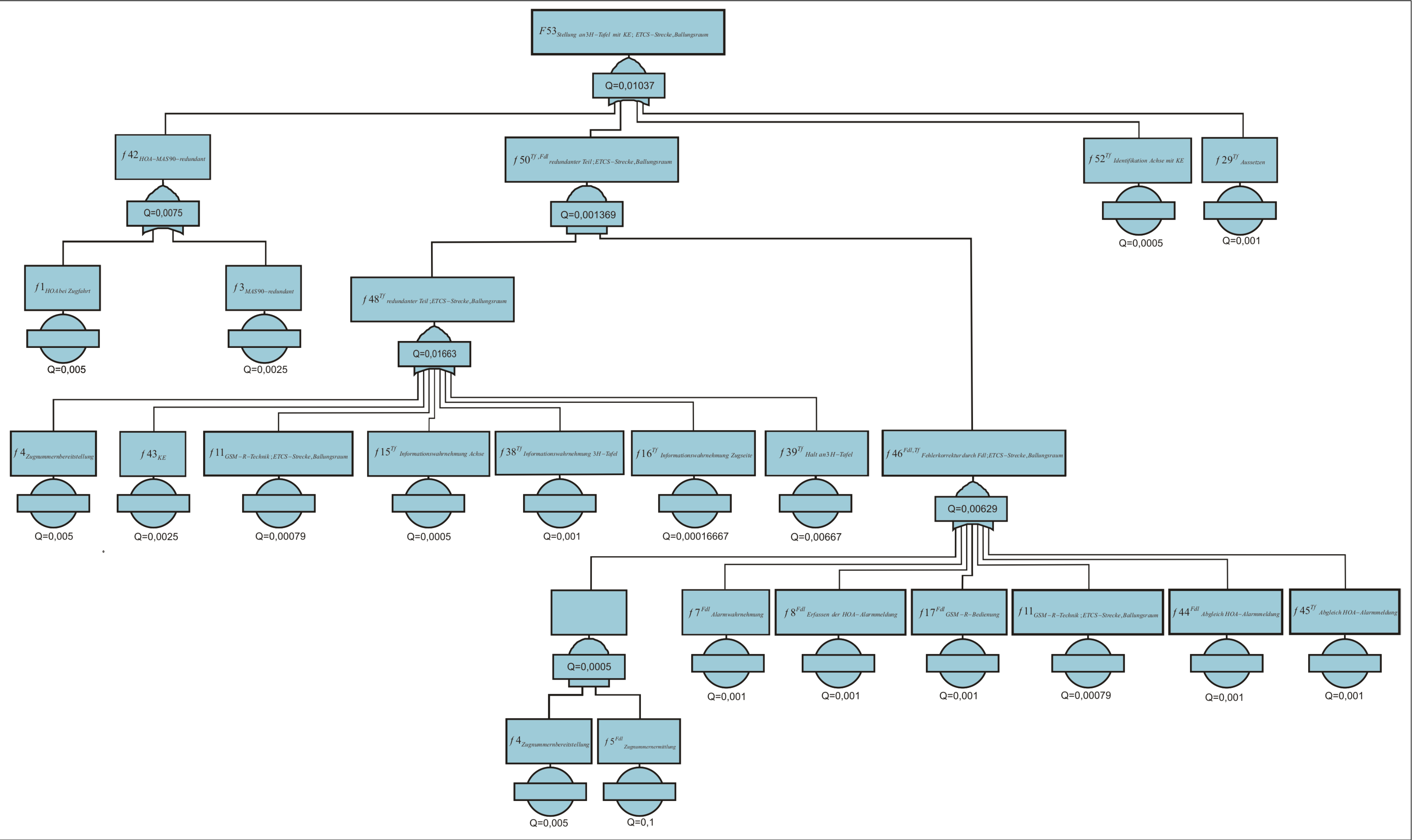


Abbildung 49: Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen mit $F53$ Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung

Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}}$ ergibt sich nach folgender Formel:

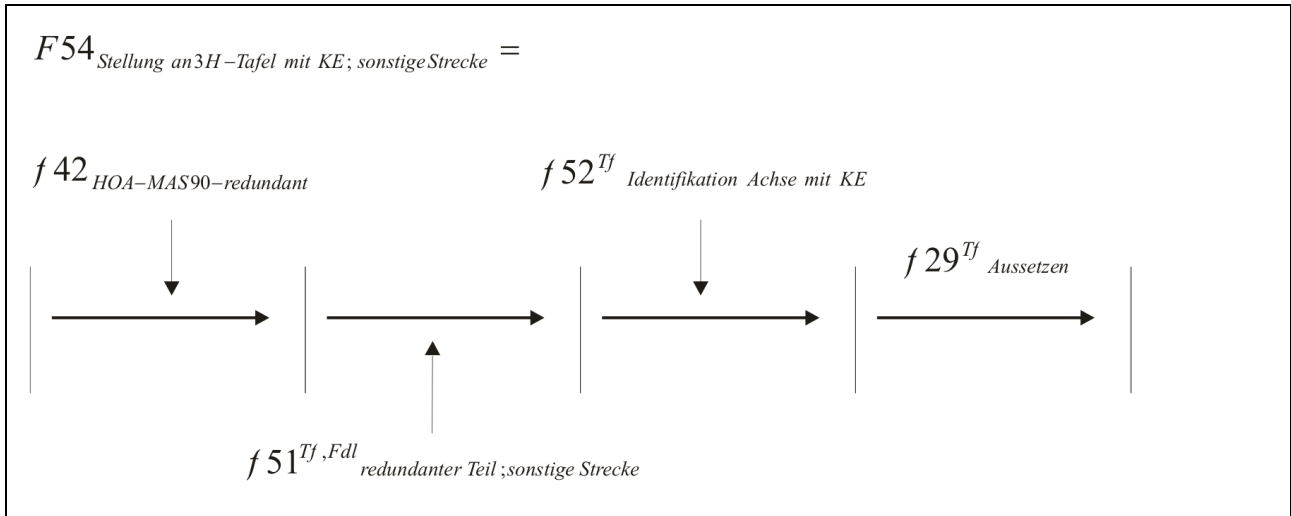


Abbildung 50: Pfeildarstellung der Formel 42, wobei $f42_{\text{HOA-MAS90-redundant}}$ die Versagenswahrscheinlichkeit zu 1., $f51_{\text{Tf,Fdl redundanter Teil;sonstige Strecke}}$ die Versagenswahrscheinlichkeit zu 2. bis 5b., $f52_{\text{Tf Identifikation Achse mit KE}}$ die Versagenswahrscheinlichkeit zu 6. und $f29_{\text{Tf Aussetzen}}$ die Versagenswahrscheinlichkeit zu 7. in Abbildung 40 beinhalten.

Formel 42

$$\begin{aligned}
 F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}} &= \\
 f42_{\text{HOA-MAS90-redundant}} + f51_{\text{Tf,Fdl redundanter Teil;sonstige Strecke}} + f52_{\text{Tf Identifikation Achse mit KE}} + \\
 f29_{\text{Tf Aussetzen}} \\
 &= 7,5 \cdot 10^{-3} + 5,27 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-3} \\
 &= 1,43 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned}$$

mit:

- $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}}$ = Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf sonstigen Strecken (1. bis 7. in Abbildung 40),
- $f42_{\text{HOA-MAS90-redundant}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen an das System MAS 90“ (Formel 26),
- $f51_{\text{Tf,Fdl redundanter Teil;sonstige Strecke}}$ = Versagenswahrscheinlichkeit für den redundanten Teil der Ereigniskette (2. bis 5b. in Abbildung 40) auf sonstigen Strecken (Kapitel 4.2.5),

- f_{52}^{Tf} *Identifikation Achse mit KE* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse mit mehrfacher Abhörmöglichkeit der HOA-Alarmmeldung durch die Kommunikationseinheit.“ (Kapitel 4.2.6),
- f_{29}^{Tf} *Aussetzen* = Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6).

Der Fehlerbaum mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F_{54}^{Stellung\ an\ 3H-Tafel\ mit\ KE;\ sonstige\ Strecke}$ wird in der folgenden Abbildung 51 dargestellt. Formel 42 ergibt für $F_{54}^{Stellung\ an\ 3H-Tafel\ mit\ KE;\ sonstige\ Strecke}$ den gleichen Wert, jedoch gerundet auf zwei Stellen nach dem Komma. Der Wert $F_{54}^{Stellung\ an\ 3H-Tafel\ mit\ KE;\ sonstige\ Strecke}$ in Formel 42 wird somit durch die Fehlerbaumquantifizierung der Software „FaultTree+“ bestätigt. Bei der Nutzung der exakten Gleichung für die ODER-Verknüpfung folgt für $F_{54}^{Stellung\ an\ 3H-Tafel\ mit\ KE;\ sonstige\ Strecke} = 0,01419$. Der Wert der Näherung und der exakten Berechnung für $F_{54}^{Stellung\ an\ 3H-Tafel\ mit\ KE;\ sonstige\ Strecke}$ weichen um ca. 0,5 % voneinander ab, sodass auch hier von einer guten Näherung bei der Anwendung der Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ gesprochen werden kann.

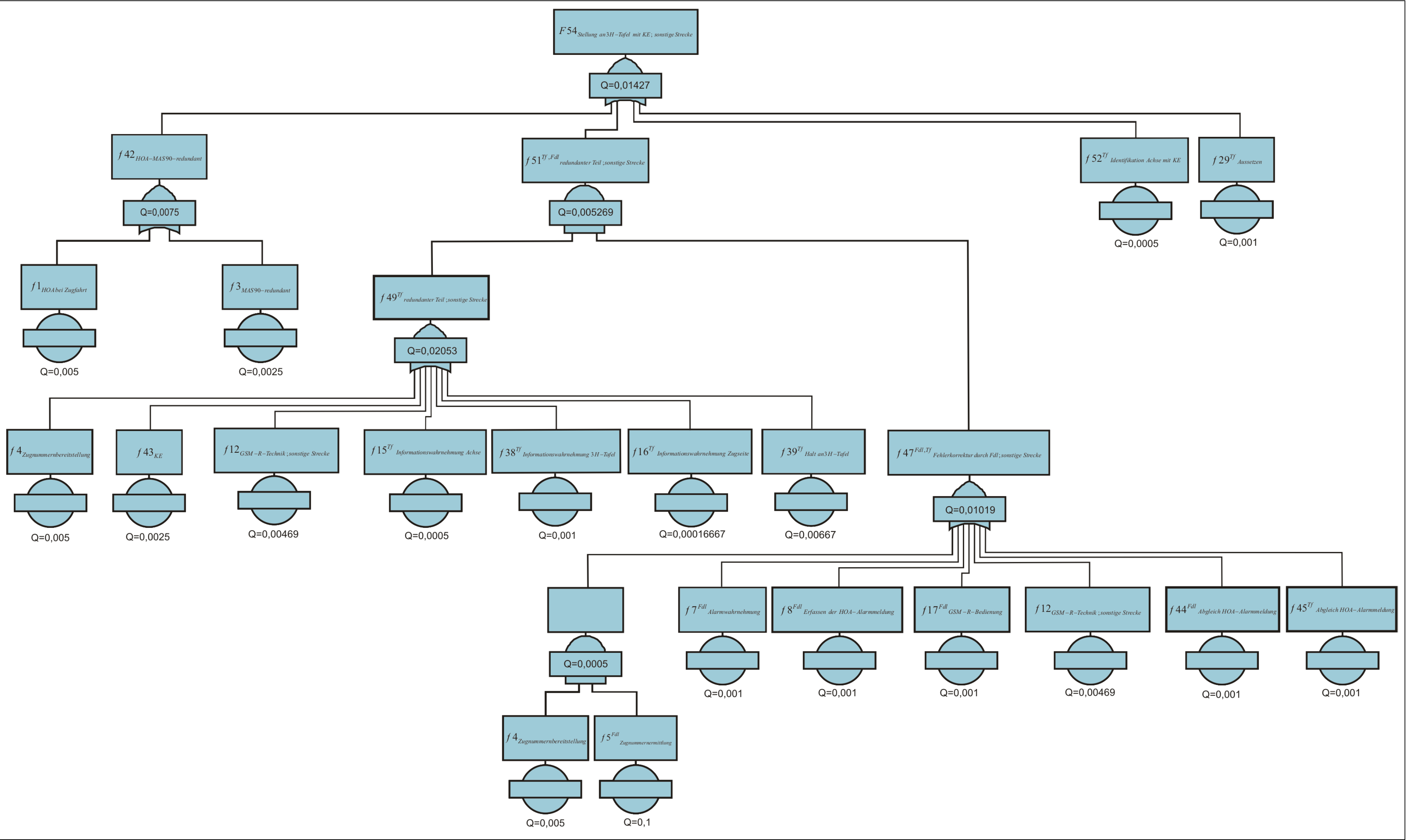


Abbildung 51: Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißbläuerfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf sonstigen Strecken mit $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}}$ unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung

Ereignisketten	für Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen	für sonstige Strecken
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs <u>nach heutigen anerkannten Regeln der Technik</u>	$F30_{\text{Stellung ; ARdT , PZB90 , ETCS-Strecke , Ballungsraum}} =$ $1,52 * 10^{-2}$	$F31_{\text{Stellung ; ARdT , PZB90 , sonstige Strecken}} =$ $1,52 * 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs <u>nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik</u>	$F32_{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , ETCS-Strecke , Ballungsraum}} =$ $1,52 * 10^{-2}$	$F34_{\text{Stellung ; ARdT , LZB-Führung , sonstige Strecken}} =$ $1,52 * 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs	$F40_{\text{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke , Ballungsraum}} =$ $2,31 * 10^{-2}$	$F41_{\text{Stellung an 3H-Tafel ; sonstige Strecke}} =$ $2,71 * 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer	$F53_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE ; ETCS-Strecke , Ballungsraum}} =$ $1,04 * 10^{-2}$	$F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE ; sonstige Strecke}} =$ $1,43 * 10^{-2}$

Tabelle 4: Gegenüberstellung sämtlicher in dieser Arbeit errechneter Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

Für die nun folgende Auswertung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der acht in dieser Arbeit betrachteten Ereignisketten werden nicht die exakten Werte, sondern die Ergebnisse der Näherung verwendet, wie in Tabelle 4 gezeigt. Grund hierfür ist, dass die mithilfe der Näherung ermittelten Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten in dieser Arbeit hergeleitet wurden und sich nur geringfügig von denen der exakten Berechnung unterscheiden. Die in Kapitel 4.2 errechneten Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten $F53_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum}} = 1,04 \cdot 10^{-2}$ und $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}} = 1,43 \cdot 10^{-2}$ sind kleiner als die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der in dieser Arbeit beschriebenen Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik mit $1,52 \cdot 10^{-2}$.

Dies gilt auch dann, wenn man den Annahmen in Kapitel 4.2.6 hinsichtlich der Reduktion der Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers bei der Identifikation der detektierten Achse nicht folgt und sich somit die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten $F53_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ und $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}}$ um den Wert $5 \cdot 10^{-4}$ erhöhen würden.

Das prozessuale und technische Systemdesign, welches in Kapitel 4.2 entwickelt wurde, erfüllt den Nachweis gleicher Sicherheit im Sinne des § 2 Abs. 2 [EBO 2012]. Dieser gesetzlichen Anforderung an deren Einsatz im Eisenbahnbetrieb wurde entsprochen. Die Aussage wird über die genannten quantitativen Ergebnisse hinaus gestützt durch die Vorgehensweise der Berechnungen nach Abbildung 6. Daher ist anzunehmen, dass die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik in der Realität tendenziell größer sind als in der Arbeit berechnet.

Allerdings liegt der Wert der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}}$ mit $1,43 \cdot 10^{-2}$ nur geringfügig unter denen der heutigen Ereignisketten. Daher sollte vor dem Einsatz des in Kapitel 4.2 entwickelten Systemdesigns auf sonstigen Strecken noch einmal geprüft werden, ob der Nachweis gleicher Sicherheit auch mit den dann vorliegenden Daten und Erkenntnissen weiterhin erfüllt ist. Sollte dies nicht der Fall sein, könnten weitere Maßnahmen zur Senkung von $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}}$ ergriffen werden, wie z. B. die Erhöhung der Verfügbarkeit der dann genutzten HOA und der MAS 90 oder das Ausstatten des Triebfahrzeugführers mit geeigneten Messinstrumenten zur Temperaturmessung an HOA-detektierten Bauteilen. Die quantitativen Auswirkungen derartiger Maßnahmen könnten in nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten untersucht werden. Nach den Ergebnissen dieser Arbeit sind diesbezügliche weitere Maßnahmen jedoch nicht erforderlich.

Es ist somit in Kapitel 4.2 gelungen, ein neues Systemdesign zu entwickeln, das gegenüber der heutigen Vorgehensweise ohne teure Sicherungstechnik auskommt und eine Vielzahl weiterer Stellorte ermöglicht, was den Planungsprozess erheblich vereinfacht. Gleichzeitig ermöglicht das

neue Systemdesign zumindest auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen eine Erhöhung der Sicherheit.

5 Abschätzung des notwendigen Abstands von HOA als Ersatz für entfallene Bahnpersonale

In diesem Kapitel werden die derzeit vorgeschriebenen Abstände zwischen HOA hinsichtlich ihrer Begründbarkeit überprüft. Neue Vorschläge für den diesbezüglichen Abstand werden erarbeitet. Gleiches gilt für die Ersatzmaßnahmen, die nach den heutigen Regelungen beim Ausfall von HOA zu treffen sind.

Zu Beginn des Kapitels 3 wurde der Begriff des Heißläufers definiert als Achse, die die Regelalarmschwelle des Heißalarms, Alarms „Differenz Heiß“ oder „Feste Bremse Heiß“ überschritten hat.

Die Untersuchungen in Kapitel 5 beziehen sich ausschließlich auf Fahrzeuge mit Radsatzlager-schäden, die die Regelalarmschwellen für den Heißalarm und Alarm „Differenz Heiß“ überschrit-ten haben. **Hierfür wird einschränkend der Begriff „Lager-Heißläufer“ eingeführt.** Feste Bremsen werden nicht betrachtet.

Der Ausschluss der Festen Bremse aus den Untersuchungen resultiert aus dem Mangel an Quellen, die den Temperaturanstieg in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg eines betroffenen Fahrzeugs beschreiben. Derartige fahrzeugseitige Untersuchungen sind jedoch zwingend für die Abstandsbe-stimmung von HOA erforderlich und liegen nur für Lager-Heißläufer vor.

Da HOA heute zumeist die Funktionalität der Detektion sowohl von Lager-Heißläufern wie auch Festen Bremsen beinhalten, ist für den Abstand zwischen HOA der Schaden maßgebend, von dem die größte Gefahr ausgeht und somit den geringsten HOA-Abstand bedingt. Dies ist der Lager-Heißläufer. So ist seit mindestens 2005 keine Entgleisung bekannt, bei der eine Feste Bremse ur-sächlich gewesen wäre. Jedoch gibt es seit 2005 jährlich Entgleisungen aufgrund von Lager-Heißläufern. Somit ist der Ausschluss der Festen Bremse aus den nachfolgenden Untersuchungen dieses Kapitels ohne Auswirkungen auf den zu ermittelnden Abstand zwischen HOA.

In den letzten Jahrzehnten konnte aufgrund technischer Weiterentwicklungen eine Vielzahl von Betriebsbeamten eingespart werden, die in unmittelbarer Nähe von Eisenbahnstrecken arbeiteten. Beispielhaft sei der Einsatz von Relaisstellwerken und Elektronischen Stellwerken (ESTW) ge-nannt, von denen aus weitere Stellwerke ferngesteuert werden können. Möglich wurde dies u.a. durch die Entwicklung der technischen Gleisfreimeldung. Weiterhin erfolgte vielerorts eine Um-wandlung von mit Betriebsbeamten besetzten Bahnhöfen in unbesetzte Haltepunkte, z. B. durch den Rückbau aller Weichen und die einhergehende Auflassung der vor Ort befindlichen Stellwer-ke.

Die Bezeichnung des Betriebsbeamten wird in der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) im fünften Abschnitt „Personal“ im § 47 „Betriebsbeamte“ auch derzeit noch verwendet und wie folgt beschrieben [EBO 2012]:

„(1) Betriebsbeamte im Sinne dieser Verordnung sind die Beamten, Angestellten, Arbeiter und Bahnagenten sowie ihre Vertreter, die tätig sind als

- 1. Leitende oder Aufsichtführende in der Erhaltung der Bahnanlagen und im Betrieb der Bahn,*
- 2. Betriebskontrolleure und technische Bahnkontrolleure,*
- 3. Leiter von Bahnhöfen, Fahrdienstleiter, Zugleiter, Aufsichtsbeamte und Zugmelder,*
- 4. Leiter von technischen Dienststellen des äußeren Eisenbahndienstes sowie andere Aufsichtführende im Außendienst dieser Stellen,*
- 5. Weichensteller und Rangierleiter,*
- 6. Wagenuntersuchungs- und Bremsbeamte,*
- 7. Strecken- und Schrankenwärter,*
- 8. Zugbegleiter,*
- 9. Triebfahrzeugführer, Heizer, Triebfahrzeugbegleiter, Bediener von Kleinlokomotiven und Führer von Nebenzugfahrzeugen.*

(2) Die Betriebsbeamten sind verpflichtet, für die sichere und pünktliche Durchführung des Eisenbahnbetriebs zu sorgen. Sie haben, soweit erforderlich, eine richtigzeigende Uhr zu tragen.

(3) Die Betriebsbeamten sind in der zur sicheren Durchführung des Betriebes erforderlichen Anzahl einzusetzen.“

Danach sind die Betriebsbeamten begrifflich in etwa gleichzusetzen mit den Personalen bzw. Mitarbeitern, die im Eisenbahnbetrieb sicherheitlich tätig sind.

In der Fahrdienstvorschrift [FV 1984] und gleichlautend in [FV 1976] ist der Zugbeobachtung durch Betriebsbeamte der § 32 gewidmet. Absatz 1 enthält folgende Formulierung:

„Fahrdienstleiter, örtliche Aufsichtsbeamte, Stellwerkswärter, Strecken- und Schrankenwärter, Meldeposten und andere im Bahnhofsbuch bestimmte Mitarbeiter im Betriebsdienst sollen vorbeifahrende Züge beobachten, sofern dies nicht aus örtlichen Gründen unmöglich ist.“

Laut [FV 1984] § 32 Abs. 2 ist besonders zu achten auf:

*„(...) Unregelmäßigkeiten an Fahrzeugen einschließlich Stromabnehmer und Laufwerke
(...) Feuer im Zug“.*

Der Begriff des Bahnhofsbuches wird heute nicht mehr verwendet. Es kann als Vorgänger der heutigen Örtlichen Richtlinien angesehen werden. Nach [BET 1962] waren darin u.a. verzeichnet die Zugehörigkeit des Bahnhofs zu den zuständigen Bundesbahnstellen, Einrichtungen und Aufgaben des Bahnhofs, Bestimmungen über die Leitung und Überwachung des Dienstes und allgemeine Weisungen sowie alle Anordnungen für den Dienst der Fahrdienstleiter, der Aufsichtsbeamten und der Stellwerks- und Weichenwärter.

Zu den in [FV 1984] im § 32 Abs. 2 aufgeführten Ereignissen zählt auch das Achten auf Lager-Heißläufer. Ferner wird in Absatz 3 ausgeführt: *„Alle Wahrnehmungen, die auf Unregelmäßigkeiten am Zug schließen lassen, sind sofort von den Betriebsstellen des Bahnhofs dem Fahrdienstleiter, von den Betriebsstellen der freien Strecke den vorliegenden Betriebsstellen bis zur nächsten Zugmeldestelle zu melden (...)“*

Die bei Beobachtung eines mit Unregelmäßigkeiten behafteten Zuges zu treffenden Maßnahmen werden in [FV 1984], § 27 Abs. 2 beschrieben:

„Wird einem Mitarbeiter im Betriebsdienst eine drohende Gefahr bekannt, hat er sofort zur Sicherung gefährdeter Züge erforderliche Maßnahmen (z. B. Signale auf Halt stellen, Schutzsignale oder Nothaltaufträge geben, Gleise sperren) zu treffen. Züge müssen gestellt werden, sofern nicht durch das Anhalten die Gefahr vergrößert wird.“

Höhere Geschwindigkeiten und weniger werdende Personale (Schrakenposten, Blockwärter etc.) erforderten in steigendem Maße, Eisenbahnfahrzeuge während ihrer Fahrt automatisch zu überwachen [PACH 1982]. Unter anderem aus diesem Grund wurden HOA im Netz der Deutschen Bundesbahn errichtet, welche durch die Deutsche Bahn AG weiter verdichtet wurden.

Für die Beantwortung der Frage, in welchem Abstand HOA im Netz zur Kompensation entfallener Personale installiert werden müssen, werden zwei rechnerische Ansätze genutzt. Im ersten Ansatz wird möglichst realistisch abgeschätzt, in welchen Abständen ein Zug durch Betriebsbeamte beobachtet wurde und in welcher Entfernung ein Lager-Heißläufer nach dessen Entstehung durch Personale detektiert werden konnte. Es wird angenommen, dass sich die Betriebsbeamten regelkonform verhalten. Somit erhält dieser als realistisch bezeichnete Ansatz eine optimistische Tendenz hinsichtlich des Verhaltens der Personale, sodass der realistische Ansatz gleichzeitig als obere Grenze bezüglich der Häufigkeit der Zugbeobachtung vor der Einführung der HOA angenommen werden kann.

Im zweiten Ansatz, im Nachgang als pessimistischer Ansatz bezeichnet, wird die untere Grenze der Zugbeobachtung durch weniger pflichtbewusste Betriebsbeamte abgeschätzt. Die untere Grenze beinhaltet den maximal anzunehmenden Abstand, in dem ein Zug auf einen zugbeobachtenden und ggf. heißläuferdetektierenden Betriebsbeamten vor der Einführung der HOA traf. Aus beiden Ansätzen soll anschließend auf Kilometerintervalle für die Installation von HOA auf dem deut-

schen Eisenbahnnetz geschlossen werden und auf erforderliche Ersatzmaßnahmen beim Ausfall von HOA.

5.1 Abschätzung der Häufigkeit der Lager-Heißläuferdetektion durch Betriebsbeamte im Jahr 1983

Der technische Fortschritt und die einhergehende Einsparung von Betriebsbeamten an der freien Strecke und in Bahnhöfen erfolgten in einem fortlaufenden Prozess. In [PACH 1992] wird ausgeführt, dass in einer ersten Ausbaustufe zwischen ca. 1972 bis 1980 im Netz der Deutschen Bundesbahn 54 HOA installiert wurden. Diese beinhalteten jedoch erhebliche konzeptionelle und technische Mängel. Erst ab ca. 1980 stand eine HOA-Technik zur Verfügung, die zufriedenstellende Sicherheitsfunktionsrealisierungen aufwies. Die neue Technik wurde in einer zweiten Ausbaustufe ab 1980 im Streckennetz der Deutschen Bundesbahn installiert [PACH 1992].

Ab welchem Zeitpunkt HOA der zweiten Ausbaustufe in nennenswertem Umfang zur Überwachung des Bahnbetriebes genutzt werden konnten, ist nicht bekannt.

Nach persönlicher Einschätzung des Autors könnte dies erst ab ca. 1983 der Fall gewesen sein, da die Anlagen vorab geplant, produziert, installiert und abgenommen werden mussten. Daher wird in dieser Arbeit das Jahr 1983 als dasjenige angenommen, ab dem technisch zufriedenstellende HOA die Aufgaben der entfallenen Personale an den Strecken und in Bahnhöfen übernahmen.

Daraus folgend wird in dieser Arbeit die Anzahl der Lager-Heißläuferdetektionen durch Bahnpersonale vor Ort im Jahr 1983 als akzeptiertes Sicherheitsniveau zugrunde gelegt.

Die Inhalte des Kapitels 5 gelten nur für Strecken bis zu einer Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h, da es im Jahr 1983 keinen planmäßigen Zugverkehr mit höheren Geschwindigkeiten gab.

Um das Sicherheitsniveau von 1983 als Grundlage für die Betrachtung heutiger Verhältnisse annehmen zu können, muss diesbezüglich eine Vergleichbarkeit des Bahnsystems im Jahr 1983 und heute vorausgesetzt werden können. Dies ist möglich, da zu beiden Zeitpunkten der Anspruch, einen sicheren Eisenbahnbetrieb zu gewährleisten, wie es derzeit im § 4 Abs. 1 und 3 des Allgemeinen Eisenbahngesetzes festgeschrieben ist, zugrunde gelegt werden kann. Daraus kann gefolgert werden, dass der Anspruch an die Sicherheit von Fahrzeugen und das Niveau der Instandhaltung in etwa gleich geblieben sind.

Ein weiteres Vergleichskriterium ist die von den Zügen gefahrene Geschwindigkeit. Für die Zuggeschwindigkeiten im Güterverkehr liegen keine Daten vor. Hier muss eine Abschätzung vorgenommen werden. Nach Einschätzung des Autors verkehrt derzeit der weit überwiegende Teil der

Güterzüge mit einer fahrzeugbedingten Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h bis 100 km/h. Die im Jahr 1983 für den Güterverkehr zur Verfügung stehenden Triebfahrzeuge, welche schwerpunktmäßig die Baureihen 216 bis 218, 140, 141, 150 und 151 umfassten, konnten bereits in diesem Geschwindigkeitsbereich Güterzüge befördern. Es ist daher anzunehmen, dass sich die Geschwindigkeit der Züge auf Strecken bis 200 km/h seit 1983 bis heute nicht soweit geändert hat, dass dies signifikant für die Entstehung von Lager-Heißläufern und deren Temperaturanstieg wäre.

Es ist nachfolgend in einem ersten Schritt abzuschätzen, in welchen Abständen ein Zug durch Betriebsbeamte im Jahr 1983 beobachtet wurde. Im zweiten Schritt wird abgeleitet, in welchem Abstand HOA installiert werden müssen, um ein gleiches Sicherheitsniveau hinsichtlich der HOA-Detektion zu erreichen.

Aus dem Bereich der Deutschen Reichsbahn liegen für diesen Zeitraum keine Informationen über HOA vor, sodass diesbezüglich keine weiteren Erkenntnisse für diese Arbeit genutzt werden können.

5.1.1 Detektion von Lager-Heißläufern durch Betriebsbeamte im Bahnhof vor Einführung der HOA nach dem realistischen Ansatz

Für die Detektion des Lager-Heißläufers durch Betriebsbeamte an der Strecke sind zwei Voraussetzungen erforderlich:

- Der Betriebsbeamte beobachtet den Zug,
- der Betriebsbeamte steht, während er den Zug beobachtet, auf derjenigen Seite des Zuges, an der sich der Lager-Heißläufer befindet bzw. wahrnehmbar ist.

Im Bereich von Bahnhöfen konnten Lager-Heißläufer neben den in [FV 1984] genannten Betriebsbeamten auch von:

- Instandhaltungspersonalen,
- Wagenuntersuchungsbeamten,
- Posten am Bahnübergang und
- Rangierern

detektiert werden. Andere ggf. ebenfalls im Bahnhofsbuch zur Zugbeobachtung bestimmte Mitarbeiter im Betriebsdienst werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Denn hierbei handelte es sich nur um Einzelfälle, die keinesfalls in jedem Bahnhof vorkamen und somit nur untergeordnete Bedeutung hatten.

Die Detektion eines Zuges mit einem Lager-Heißläufer setzt nicht nur das Auftreten, sondern auch dessen Detektierbarkeit für den Menschen voraus. Bevor der Betriebsbeamte einen Lager-Heißläufer erkennen kann, muss sich der Lager-Heißläufer bereits soweit erwärmt haben, dass

eine Lichtemission erkennbar ist. Es wird für die Detektion von Lager-Heißläufern durch den Menschen angenommen, dass Bauteile im Bereich der Heißläuferachse bereits glühen und somit für das Personal sichtbar sind.

Um die Wahrscheinlichkeit der Lager-Heißläuferdetektion durch Betriebsbeamte in Abhängigkeit des vom Zug mit Lager-Heißläufer gefahrenen Weges zu bestimmen, sind folgende Betrachtungen erforderlich:

- In welchen Abständen traf ein Zug auf einen zugbeobachtenden Betriebsbeamten?
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit stand der zugbeobachtende Betriebsbeamte auf der Seite des Lager-Heißläufers, sodass er diesen detektieren konnte?

Die Genauigkeit der Ergebnisse der nachfolgenden Formeln ist rein mathematisch begründet. Berechnungsergebnisse, aus denen Aussagen für die Praxis für den Bau und Betrieb von Eisenbahnanlagen abgeleitet werden, müssen daher hinsichtlich ihrer Genauigkeit anschließend interpretiert werden.

Fand eine Zugbeobachtung statt und stand der zugbeobachtende Betriebsbeamte auf der Seite des Lager-Heißläufers wird nachfolgend davon ausgegangen, dass der Betriebsbeamte den Lager-Heißläufer erkannt hat. Eine diesbezügliche Versagenswahrscheinlichkeit des Betriebsbeamten wird nicht betrachtet, da diese für eine fertigkeitstbasierende Tätigkeit im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ liegt und somit auf die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Lager-Heißläuferdetektion in nachfolgenden Betrachtungen einen zu vernachlässigenden Einfluss hat.

Die im Folgenden in Kapitel 5 aufgeführten quantitativen Aussagen zu Betriebslängen des Netzes der Deutschen Bundesbahn und zur Anzahl technischer Anlagen betreffen das Jahr 1983 und sind den in [BLAU 1983] veröffentlichten Infrastrukturangaben entnommen.

Die Streckenlänge der Deutschen Bundesbahn wies am 31.12.1983 eine Betriebslänge von 28045 km auf. Davon entfielen 7408 km auf Bahnhofsbereiche, während die restlichen 20637 km außerhalb derselben, d. h. als „freie Strecke“ verliefen. Zum selben Zeitpunkt gehörten auch 3882 Bahnhöfe zum Streckennetz der Deutschen Bundesbahn [BLAU 1983].

Daraus lässt sich die durchschnittliche Betriebslänge eines Bahnhofs $s100_{Bhf}$ ermitteln als Quotient aus der Betriebslänge aller Bahnhöfe und der Anzahl der Bahnhöfe.

Die durchschnittliche Betriebslänge eines Bahnhofs im Netz der Deutschen Bundesbahn wird bestimmt:

Formel 43

$$s100_{Bhf} = \frac{s101_{Bhf, gesamt}}{n102_{Bhf}} = \frac{7408 \text{ km}}{3882} = 1,908 \text{ km}$$

mit:

- $s101_{Bhf, gesamt}$ = Betriebslänge aller Bahnhöfe in [km],
- $n102_{Bhf}$ = Anzahl der Bahnhöfe.

Bediener von Befehlsstellen, Fahrdienstleiter und Weichenwärter konnten die Zugbeobachtung vom Stellwerk aus durchführen. Die Anzahl der im Jahr 1983 mit Personal besetzten Stellwerke in Bahnhöfen im Netz der Deutschen Bundesbahn $n103_{Stw, Bf, besetzt}$ errechnet sich wie folgt:

Formel 44

$$\begin{aligned} n103_{Stw, Bf, besetzt} &= n104_{Befehlsstellen} + n105_{Befehlsstellwerke} + n106_{Zentralstellwerke} + n107_{Wärterstellwerke} \\ &- n108_{Stw, ferngesteuert} \\ &= 58 + 1005 + 2217 + 1137 - 218 = 4199 \end{aligned}$$

mit:

- $n104_{Befehlsstellen}$ = Anzahl der mit Personal besetzten Befehlsstellen in Bahnhöfen,
- $n105_{Befehlsstellwerke}$ = Anzahl der mit Personal besetzten Befehlsstellwerke in Bahnhöfen,
- $n106_{Zentralstellwerke}$ = Anzahl der mit Personal besetzten Zentralstellwerke in Bahnhöfen,
- $n107_{Wärterstellwerke}$ = Anzahl der mit Personal besetzten Wärterstellwerke in Bahnhöfen,
- $n108_{Stw, ferngesteuert}$ = Anzahl der ferngesteuerten und somit nicht mit Personal besetzten Stellwerke.

Die Eingangswerte der Formel 44 wurden [BLAU 1983] entnommen.

Da in [BLAU 1983] darauf hingewiesen wird, dass es im Bahnhof auch einzelne ständig oder zeitweilig nicht besetzte Stellwerke gab, wird in dieser Arbeit nachfolgend davon ausgegangen, dass die in Formel 44 als „besetzt“ genannten Stellwerke in der Regel mit Personal besetzt waren, sobald Züge in deren Stellbereichen fuhren.

Die ebenfalls in [BLAU 1983] genannten 370 Rangierstellwerke (auch Ablaufstellwerke) wurden bei gegebener Betrachtung nicht berücksichtigt, da diese sich vorrangig in Rangierbereichen befanden und somit für die Beobachtung von Zugfahrten von untergeordneter Bedeutung gewesen sein dürften.

Pro Bahnhof gab es daher im Durchschnitt die folgende Anzahl besetzter Stellwerke $n109_{besetzte Stw pro Bf}$, von denen aus Züge mit Lager-Heißläufern beobachtbar waren:

Formel 45

$$n109_{\text{besetzte Stw pro Bf}} = \frac{n103_{\text{Stw, Bf, besetzt}}}{n102_{\text{Bf}}} = \frac{4199}{3882} = 1,08$$

mit:

- $n103_{\text{Stw, Bf, besetzt}}$ = Anzahl der mit Personal besetzten Stellwerke in Bahnhöfen (Formel 44),
- $n102_{\text{Bf}}$ = Anzahl der Bahnhöfe (Formel 43).

Vor dem Hintergrund der durchschnittlich 1,08 besetzten Stellwerke pro Bahnhof, auf denen Fahrdienstleiter, Bediener von Befehlsstellen und Stellwerkswärter ihren Dienst ausführen und der zusätzlich genannten im Bahnhof tätigen Betriebsbeamten, ist davon auszugehen, dass Zugbeobachtungen im Bahnhof zum normalen Dienstag gehörten.

Eine weitere Zugbeobachtungsmöglichkeit bestand am technisch gesicherten Bahnübergang durch den Schrankenwärter bzw. bei nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen durch den Bahnübergangsposten.

Schrankenwärter sind örtliche Personale, die die bedienerbewirkte Einschaltung des Bahnübergangs vornehmen [MASC 2012].

In [RIL 456] wird der Begriff des Schrankenpostens definiert: „*Der Schrankenposten ist der Arbeitsplatz eines Schrankenwärters.*“ „*Mitarbeiter, die keine Schrankenwärter sind und einen BÜ selbsttätig sichern, werden als Bahnübergangsposten (BÜP) bezeichnet.*“

Schrankenposten im Bahnhof werden nicht betrachtet, da Schranken im Bahnhofsbereich in der Regel durch das Stellwerkspersonal mit bedient wurden. Es ist nicht ausgeschlossen, dass es 1983 noch Schrankenposten im Bahnhofsbereich gab, wie z. B. im Bahnhof Fürth Hbf, dessen Fragmente noch heute erkennbar sind. Jedoch werden sowohl in [BLAU 1983] wie auch in [DEBA 1985] keine derartigen Einrichtungen erwähnt.

Für die Wahrscheinlichkeit, mit der:

- der Zug bei der Fahrt durch den Bahnhof vom Bahnhofspersonal beobachtet wurde $P111_{\text{Personal Zugbeobachtung, Bf}}$ und
- sich der Zugbeobachter auf der Seite des Lager-Heißläufers befand $P112_{\text{Personal Standort auf Heißläuferseite, Bf}}$, liegen keine Daten vor.

Beide Ereignisse werden mangels weiterer Informationen vom Autor mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 abgeschätzt.

Die Annahme der Wahrscheinlichkeit von 0,5 bei binären Ereignissen wurde in [HINZ 1993] vorgenommen, wenn anderslautend keine belastbaren Daten bzw. Erkenntnisse vorlagen und dies

näherungsweise als realistisch angenommen werden kann. Dieser Grundsatz wird hier ebenfalls angewendet.

Bei näherer Betrachtung erscheint der Wert 0,5 für $P111_{Zugbeobachtung, Bf}^{Personal}$ diesbezüglich jedoch eher optimistisch. In größeren Bahnhöfen mit mehreren hintereinander liegenden Gleisen kann der Betriebsbeamte einen Zug ohnehin nur beobachten, wenn sich vor dem zu beobachtenden Zug keine weiteren Eisenbahnfahrzeuge befinden. Gerade bei größeren Bahnhöfen kann hiervon keinesfalls immer ausgegangen werden. Im Umfeld von Bahnsteigen kann grundsätzlich nur eine eingeschränkte Zugbeobachtung der Fahrzeuge im Bereich der Achsen erfolgen, da hier die Bahnsteige den Blick auf die relevanten Bauteile eines vorbeifahrenden Zuges verdecken. Gleiches gilt für den Fahrdienstleiter, wenn sich dessen Stellwerk im Erdgeschoss eines Empfangsgebäudes mit vorgelagertem Bahnsteig befindet, wie z. B. bis zum Jahr 2013 im Bahnhof Kitzingen. Eine Vielzahl weiterer Gründe können Stellwerkspersonale abhalten, vorbeifahrende Züge zu beobachten. Störungen oder Umbauarbeiten im Stellbereich des Stellwerks führen nicht selten zu Mehrarbeit und einem erhöhten Kommunikationsaufwand mit benachbarten Betriebsstellen oder mit an der Strecke tätigen Betriebsbeamten. Die Zugbeobachtung kann dabei nur eingeschränkt erfolgen oder unterbleibt gänzlich.

Die Annahme des Wertes 0,5 für die Wahrscheinlichkeit, wonach sich der Betriebsbeamte, der einen Zug mit einem Lager-Heißläufer beobachtete, auf der Seite des Lager-Heißläufers befand ist nachvollziehbar. Denn es gibt keine Hinweise, wonach Betriebsbeamte im Jahr 1983 vermehrt nur eine von beiden Zugseiten beobachtet hätten.

Die Wahrscheinlichkeit $P110_{Heißläuferdetektion, Bf}^{Personal}$, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei der Durchfahrt im Bahnhof durch das dort tätige Personal detektiert wurde, ergibt sich aus:

Formel 46

$$P110_{Heißläuferdetektion, Bf}^{Personal} = P111_{Zugbeobachtung, Bf}^{Personal} * P112_{Standort auf Heißläuferseite, Bf}^{Personal} = 0,5 * 0,5 = 0,25$$

mit:

- $P111_{Zugbeobachtung, Bf}^{Personal}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug bei der Fahrt durch den Bahnhof von einem Zugbeobachter beobachtet wurde,
- $P112_{Standort auf Heißläuferseite, Bf}^{Personal}$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich das zugbeobachtende Personal im Bahnhof auf der Seite des Lager-Heißläufers befand.

5.1.2 Zugbeobachtung von Betriebsbeamten vor Ort vor Einführung der HOA auf der freien Strecke nach dem realistischen Ansatz

Als Betriebsbeamte, die auf der freien Strecke Zugbeobachtungen vornehmen konnten, sind vorrangig zu nennen:

- Fahrdienstleiter von Stellwerken an der freien Strecke,
- örtliche Aufsichtsbeamte besetzter Haltestellen und Haltepunkte,
- Schrankenwärter,
- Instandhaltungspersonale und
- Betriebsbeamte von besetzten Blockstellen.

In den nachfolgenden Formelzeichen steht der Index „fS“ für „freie Strecke“. Die durchschnittliche Länge eines Abschnitts der freien Strecke zwischen zwei Bahnhöfen $s_{113_{fS, \text{Abschnitt}}}$ betrug im Jahr 1983:

Formel 47

$$s_{113_{fS, \text{Abschnitt}}} = \frac{s_{114_{fS, \text{gesamt}}}}{n_{102_{Bf}}} = \frac{20637 \text{ km}}{3882} = 5,313 \text{ km}$$

mit:

- $s_{114_{fS, \text{gesamt}}}$ = Betriebslänge der freien Strecke in [km] (Kapitel 5.1.1),
- $n_{102_{Bf}}$ = Anzahl der Bahnhöfe (Formel 43).



Abbildung 52: Durchschnittliche Folge von Bahnhöfen und Abschnitten der freien Strecke im Netz der Deutschen Bundesbahn im Jahr 1983

In Abbildung 52 wird die aus der Formel 43 und Formel 47 abgeleitete durchschnittliche Folge von Bahnhöfen und Abschnitten der freien Strecke gezeigt.

Im Jahr 1983 gab es nach [BLAU 1983] im Netz der Deutschen Bundesbahn 285 ständig besetzte Stellwerke an der freien Strecke. Davon waren:

- 34 Knotenstellwerke,
- 17 Streckenstellwerke,
- 135 handbediente Blockstellen,
- 74 Stellwerke an Abzweigstellen,
- 16 Deckungsstellen,

- 3 Stellwerke an Anschlussstellen und
- 6 Stellwerke an Ausweichanschlussstellen.

Im Unterschied zum Bahnhof werden 77 Stellwerke der freien Strecke, die in [BLAU 1983] als ständig oder zeitweilig nicht besetzt gekennzeichnet sind, nicht berücksichtigt. Hintergrund ist die Annahme, dass z. B. Stellwerke an Anschlussstellen realistischerweise nur dann besetzt waren, wenn diese bedient wurden. Somit fand der Zugverkehr, der die Anschlussstelle passierte, überwiegend ohne die Besetzung dieser Stellwerke und somit ohne die Detektionsmöglichkeit von Lager-Heißläufern durch Betriebsbeamte statt. Aus gleichen Erwägungen unberücksichtigt bleiben 30 Stellwerke der freien Strecke, die durchschaltbar waren.

Ebenfalls für die Betrachtung der freien Strecke nicht berücksichtigt werden drei Stellwerke Dritter, die von der Deutschen Bundesbahn unterhalten wurden. Deren Grundgesamtheit war in Bezug auf die Gesamtanzahl der Stellwerke sehr gering. Außerdem ist fraglich, ob sich diese drei Stellwerke an Gleisabschnitten befanden, die zum Streckennetz der Deutschen Bundesbahn gehörten.

Die durchschnittliche Entfernung $s115_{Stw-Abstand, fS}$ zwischen zwei Stellwerken bezogen auf die freie Strecke wird nachfolgend berechnet:

Formel 48

$$s115_{Stw-Abstand, fS} = \frac{s114_{fS, gesamt}}{n116_{Stw, fS}} = \frac{20637 \text{ km}}{285} = 72,410 \text{ km}$$

mit:

- $s114_{fS, gesamt}$ = Betriebslänge der freien Strecke in [km] (Kapitel 5.1.1 und Formel 47),
- $n116_{Stw, fS}$ = Anzahl der ständig besetzten Stellwerke auf der freien Strecke.

Abgeleitet aus Formel 46 wird auch für die freie Strecke abgeschätzt, dass die Wahrscheinlichkeit, wonach der Zug bei der Fahrt vorbei an einem Stellwerk der freien Strecke von einem Stellwerksmitarbeiter beobachtet wurde $P118_{Stellwerkspersonal, Zugbeobachtung, Stw, fS}$ und sich der Stellwerksmitarbeiter auf der Seite des Lager-Heißläufers befand $P119_{Stellwerkspersonal, Standort auf Heißläuferseite, fS}$ bei je 0,5 liegt. Die auf den Wert 0,5 festgelegte Wahrscheinlichkeit, wonach ein Zug bei der Vorbeifahrt an einem Stellwerk der freien Strecke von einem Stellwerksmitarbeiter beobachtet wurde, erscheint ebenfalls eher optimistisch. Insbesondere bei Abzweigstellen, an denen sich Strecken nicht höhengleich kreuzen, muss davon ausgegangen werden, dass der Fahrdienstleiter auf einen Teil der in seinem Stellbereich verkehrenden Züge zu keinem Zeitpunkt eine ausreichende Sicht für eine Zugbeobachtung hatte.

Die Wahrscheinlichkeit $P117^{\text{Stellwerkspersonal Heißläuferdetektion pro km, fS}}$, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke durch einen Stellwerksmitarbeiter detektiert wurde, errechnet sich wie folgt:

Formel 49

$$P117^{\text{Stellwerkspersonal Heißläuferdetektion pro km, fS}} = \frac{P118^{\text{Stellwerkspersonal Zugbeobachtung, Stw, fS}} * P119^{\text{Stellwerkspersonal Standort auf Heißläuferseite, fS}}}{72,410} = \frac{0,5 * 0,5}{72,410} = 0,003$$

mit:

- $P118^{\text{Stellwerkspersonal Zugbeobachtung, Stw, fS}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug bei der Vorbeifahrt an einem Stellwerk der freien Strecke von einem Stellwerksmitarbeiter beobachtet wurde,
- $P119^{\text{Stellwerkspersonal Standort auf Heißläuferseite, fS}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich der Stellwerksmitarbeiter der freien Strecke auf der Seite des Lager-Heißläufers befand,
- 72,410 = Normierungsgröße mit dem Wert der durchschnittlichen Entfernung zwischen zwei Stellwerken bezogen auf die freie Strecke, abgeleitet aus Formel 48.

Im Jahr 1983 gab es gemäß [BLAU 1983]:

- 1280 Schrankenwärterposten und
- 805 Posten an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen.

Diskussionswürdig ist die Frage, inwieweit die 805 Posten an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen dauerhaft besetzt waren und in nennenswertem Umfang Zugbeobachtungen durchführen konnten. In [BLAU 1983] wird ausgesagt, dass diese regelmäßig den betroffenen Bahnübergang zu sichern hatten. Es kann daraus geschlossen werden, dass diese bei Zugfahrten vor Ort waren und den vorbeifahrenden Zug beobachten konnten, auch wenn diese Posten sich wahrscheinlich eher an gering frequentierten Nebenstrecken befanden. Daher werden diese Posten im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt.

In der Summe gab es 2085 Posten an Bahnübergängen, von denen aus vorbeifahrende Züge beobachtet werden konnten.

Die Berechnung der durchschnittlichen Entfernung $s120_{PBÜ-Abstand, fS}$ zwischen zwei mit Personal besetzten Bahnübergängen bezogen auf die freie Strecke ergibt sich in Abwandlung der Formel 48, wobei die in den Formelzeichen verwendete Abkürzung PBÜ „mit Personal besetzter Bahnübergang“ beinhaltet:

Formel 50

$$s120_{PBÜ-Abstand, fS} = \frac{s114_{fS, gesamt}}{n121_{PBÜ, fS}} = \frac{20637 \text{ km}}{2085} = 9,898 \text{ km}$$

mit:

- $s114_{fS, gesamt}$ = Betriebslänge der freien Strecke in [km] (Kapitel 5.1.1 und Formel 47),
- $n121_{PBÜ, fS}$ = Anzahl der mit Personal besetzten Bahnübergänge auf der freien Strecke .

Für den mit Personal besetzten Bahnübergang wird angenommen, dass dort immer die Zugbeobachtung vorgenommen wurde, wenn ein Zug dessen Bahnübergang passierte. Diese Annahme erscheint optimistisch, kann allerdings begründet werden durch die dort vorherrschenden einfachen Arbeitsabläufe. Beim Schrankenwärterposten bestehen diese im Wesentlichen aus dem Öffnen und Schließen der Schranken sowie dem Empfang des Schließbefehls und der Bestätigung des Schrankenschließens [LVTU 2009]. Bei mehrgleisigen Strecken ist der Fall denkbar, dass sich zwei Züge am Bahnübergang begegnen, sodass der Betriebsbeamte nur einen von zwei Zügen beobachten konnte. Dieser Fall wird als seltene Ausnahme angesehen und in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Wahrscheinlichkeit $P123_{Zugbeobachtung, PBÜ, fS}^{PBÜ-Personal}$, dass der Zug bei Vorbeifahrt am auf der freien Strecke mit Personal besetzten Bahnübergang durch dieses beobachtet wurde, kann daher bei optimistischer Tendenz mit dem Wert 1 festgelegt werden.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Personal am Bahnübergang der freien Strecke bei der Zugbeobachtung auf der Seite des Lager-Heißläufers befand, wird mit $P124_{Standort auf Heißläuferseite, fS}^{PBÜ-Personal} = 0,5$ angenommen.

Die Wahrscheinlichkeit $P122_{Heißläuferdetektion pro km, fS}^{PBÜ-Personal}$, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke von Personal am Bahnübergang detektiert wurde, errechnet sich wie folgt:

Formel 51

$$P122_{Heißläuferdetektion pro km, fS}^{PBÜ-Personal} = \frac{P123_{Zugbeobachtung, PBÜ, fS}^{PBÜ-Personal} * P124_{Standort auf Heißläuferseite, fS}^{PBÜ-Personal}}{9,898} = \frac{1 * 0,5}{9,898} = 0,051$$

mit:

- $P123_{Zugbeobachtung, PBÜ, fS}^{PBÜ-Personal}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einem Bahnübergang der freien Strecke von dessen Personal beobachtet wurde,

- $P124_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}^{\text{PBÜ-Personal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich das Personal am Bahnübergang der freien Strecke bei der Zugbeobachtung auf der Seite des Lager-Heißläufers befand,
- 9,898 = Normierungsgröße mit dem Wert der durchschnittlichen Entfernung zwischen zwei mit Personal besetzten Bahnübergängen, bezogen auf die freie Strecke, abgeleitet aus Formel 50.

Die Detektion von Lager-Heißläufern konnten auf der freien Strecke neben Stellwerksmitarbeitern und Mitarbeitern am Bahnübergang auch Personale besetzter Haltestellen und Haltepunkte durchführen.

Im Jahr 1983 gab es nach [BLAU 1983] 165 besetzte Haltepunkte, davon 143 an Hauptbahnen und 22 an Nebenbahnen sowie 96 besetzte Haltestellen, davon 68 an Hauptbahnen und 28 an Nebenbahnen.

Haltepunkte und Haltestellen werden im Folgenden als Personenverkehrsanlagen der freien Strecke (PVA-fS) bezeichnet. Deren Anzahl betrug 261 gemäß [BLAU 1983].

Die Berechnung des durchschnittlichen Abstandes zwischen zwei PVA-fS $s125_{\text{PVA-fS, Abstand}}$ ergibt:

Formel 52

$$s125_{\text{PVA-fS, Abstand}} = \frac{s114_{\text{fS, gesamt}}}{n126_{\text{PVA-fS}}} = \frac{20637 \text{ km}}{261} = 79,069 \text{ km}$$

mit:

- $s114_{\text{fS, gesamt}}$ = Betriebslänge der freien Strecke in [km] (Kapitel 5.1.1 und Formel 47),
- $n126_{\text{PVA-fS}}$ = Anzahl der PVA-fS.

Auch hier wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit, wonach der Zug bei der Fahrt vorbei an einer PVA-fS von einem dort tätigen Mitarbeiter beobachtet wurde $P128_{\text{Zugbeobachtung, PVA-fS}}^{\text{Personal der PVA-fS}}$ und sich dieser Mitarbeiter auf der Seite des Lager-Heißläufers befand $P129_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}^{\text{Personal der PVA-fS}}$ bei je 0,5 liegt.

Die Wahrscheinlichkeit $P127_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}}^{\text{Personal der PVA-fS}}$, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke vom Personal einer PVA-fS detektiert wurde, errechnet sich wie folgt:

Formel 53

$$P127_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}}^{\text{Personal der PVA-fS}} = \frac{P128_{\text{Zugbeobachtung, PVA-fS}}^{\text{Personal der PVA-fS}} * P129_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}^{\text{Personal der PVA-fS}}}{79,069} = \frac{0,5 * 0,5}{79,069} = 0,003$$

mit:

- $P128^{\text{Personal der PVA-fS}}$ _{Zugbeobachtung, PVA-fS} = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einer PVA-fS von dessen Personal beobachtet wurde,
- $P129^{\text{Personal der PVA-fS}}$ _{Standort auf Heißläuferseite, fS} = Wahrscheinlichkeit, dass sich das Personal der PVA-fS auf der Seite des Lager-Heißläufers befand,
- 79,069 = Normierungsgröße mit dem Wert der durchschnittlichen Entfernung zwischen zwei PVA-fS (Formel 52).

Die Wahrscheinlichkeit $P130^{\text{Personal}}$ _{Heißläuferdetektion pro km, fS}, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro gefahrenem Kilometer der freien Strecke durch Personal detektiert wurde, lässt sich ermitteln, indem die Detektionswahrscheinlichkeiten pro km der drei betrachteten Einrichtungen:

- der Stellwerke auf der freien Strecke,
- der mit Personal besetzten Bahnübergänge auf der freien Strecke und
- der mit Personal besetzten PVA-fS

zusammengefasst werden:

Formel 54

$$x1 = (1 - P127^{\text{Personal der PVA-fS}}_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}}) = 1 - 0,003 = 0,997$$

Formel 55

$$x2 = x1 * (1 - P122^{\text{PBÜ - Personal}}_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}}) = 0,997 * (1 - 0,051) = 0,946$$

Formel 56

$$x3 = x2 * (1 - P117^{\text{Stellwerkspersonal}}_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}}) = 0,946 * (1 - 0,003) = 0,943$$

Formel 57

$$P130^{\text{Personal}}_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}} = 1 - x3 = 1 - 0,943 = 0,057$$

mit:

- $P127^{\text{Personal der PVA-fS}}$ _{Heißläuferdetektion pro km, fS} = Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke vom Personal einer PVA-fS detektiert wurde (Formel 53),
- $P122^{\text{PBÜ - Personal}}$ _{Heißläuferdetektion pro km, fS} = Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke von Personal am Bahnübergang detektiert wurde (Formel 51),

- $P117^{\text{Stellwerkspersonal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke durch einen Stellwerksmitarbeiter detektiert wurde (Formel 49),
- $x1, x2$ und $x3$ = Hilfsvariablen.

Der Wert $P130^{\text{Personal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}$ = 0,057 soll nachfolgend diskutiert werden.

Neben den Stellwerkspersonalen, Personalen am Bahnübergang und an PVA-fS gab es weitere Personale an der freien Strecke, die Lager-Heißläuferdetektionen vornehmen konnten. Dies sind Betriebsbeamte, die mobil an der Strecke tätig waren, d. h. keinen ortsfesten Arbeitsplatz an der Strecke hatten. Hierzu gehörten beispielsweise Bau- und Instandhaltungspersonale. Für die Quantifizierung der Häufigkeit von Zugbeobachtungen dieser Betriebsbeamten liegt kein Datenmaterial vor. Die Lager-Heißläuferdetektion war nicht deren originäre Aufgabe. Es ist anzunehmen, dass es diesbezügliche Zugbeobachtungen in Einzelfällen gegeben hat. Es ist jedoch zweifelhaft, ob solche Beobachtungen in nennenswertem Umfang vorkamen. Daher werden diese Personale nicht berücksichtigt, was die errechnete Wahrscheinlichkeit $P130^{\text{Personal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}$ (Formel 57) gegenüber der Realität im Jahr 1983 tendenziell verringert.

Auch der Beitrag der 805 regelmäßig durch Personale zu sichernden Bahnübergänge ohne technische Sicherung kann nicht mit letzter Sicherheit bestimmt werden. Jedoch ist davon auszugehen, dass sich diese Bahnübergänge an Strecken mit unterdurchschnittlicher Zugfrequenz befanden, da nach [EBO 1982] bei höheren Zugfrequenzen technische Sicherungen an Bahnübergängen vorgeschrieben waren. Die Berücksichtigung der 805 nicht technisch gesicherten Bahnübergänge für das gesamte Eisenbahnnetz, wie hier mangels anders lautender Daten geschehen, erhöht tendenziell den Wert von $P130^{\text{Personal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}$.

Aufgrund der vorhandenen Infrastrukturdaten aus [BLAU 1983] in Verbindung mit den genannten Abschätzungen kann von einer realitätsnahen Bestimmung des Wertes $P130^{\text{Personal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}$ ausgegangen werden.

5.1.3 Detektionshäufigkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch den Menschen nach dem realistischen Ansatz

Nachfolgend wird errechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Zug mit Lager-Heißläufer in Abhängigkeit der gefahrenen Wegstrecke vom Personal detektiert wurde.

Hierzu ist eingangs zu klären, ab welcher Temperatur ein Lager-Heißläufer für den Zugbeobachter detektierbar, d.h. sichtbar und somit wahrnehmbar wird. In [UNLE 2013] wird ausgeführt, dass Metalle unter 400 °C ausschließlich unsichtbare Infrarotstrahlung aussenden. Ab ca. 400 °C be-

ginnt die Lichtemission mit der farblosen Grauglut, die nur in der Dunkelheit wahrnehmbar ist. Ab 525 °C beginnt die Rotglut.

Ob die Grauglut bei vorbeifahrenden Zügen vom Menschen identifiziert werden kann, ist zu bezweifeln. Dies gilt insbesondere, da sie bei Tageslicht grundsätzlich nicht sichtbar ist. Auch muss bezweifelt werden, ob die Grauglut im Umfeld der Drehgestelle überhaupt erkannt werden kann, da die Bauteile in diesem Bereich ohnehin meist in den Farben grau bzw. schwarz gehalten sind bzw. durch Verschmutzung diese annehmen. Daher wird die Grauglut im Zusammenhang mit Lager-Heißläufern und deren Detektion durch den Menschen nicht weiter betrachtet.

Als Maßgabe für die Detektion von Lager-Heißläufern durch Personal wird daher die Rotglut ab 525 °C festgelegt. Sie ist auch am Tage erkennbar und macht den Lager-Heißläufer für den Menschen von nicht beschädigten Bauteilen farblich unterscheidbar. Auch kann bei deren Auftreten von starken Zerstörungen ausgegangen werden, sodass nach [FV 1984] zusätzlich hörbare Geräusche bzw. der Geruch von Metallabrieben wahrnehmbar werden.

Es sind zwei Szenarien zu untersuchen:

- Szenario 1: Der Lager-Heißläufer wird wahrnehmbar, während der Zug durch den Bahnhof fährt,
- Szenario 2: Der Lager-Heißläufer wird wahrnehmbar, während der Zug auf der freien Strecke fährt.

Es wird angenommen, dass die Lager-Heißläufer bei der Fahrt des Zuges gleichverteilt auftreten. Für Szenario 1 wird somit festgelegt, dass der Lager-Heißläufer ab der Mitte des Bahnhofs wahrnehmbar wird, für Szenario 2 ab der Mitte des Abschnitts der freien Strecke. In den nachfolgenden Berechnungen zu den Szenarien 1 und 2 wird im Index der Formelzeichen das Szenario mit dem Kürzel „Sz“ versehen.

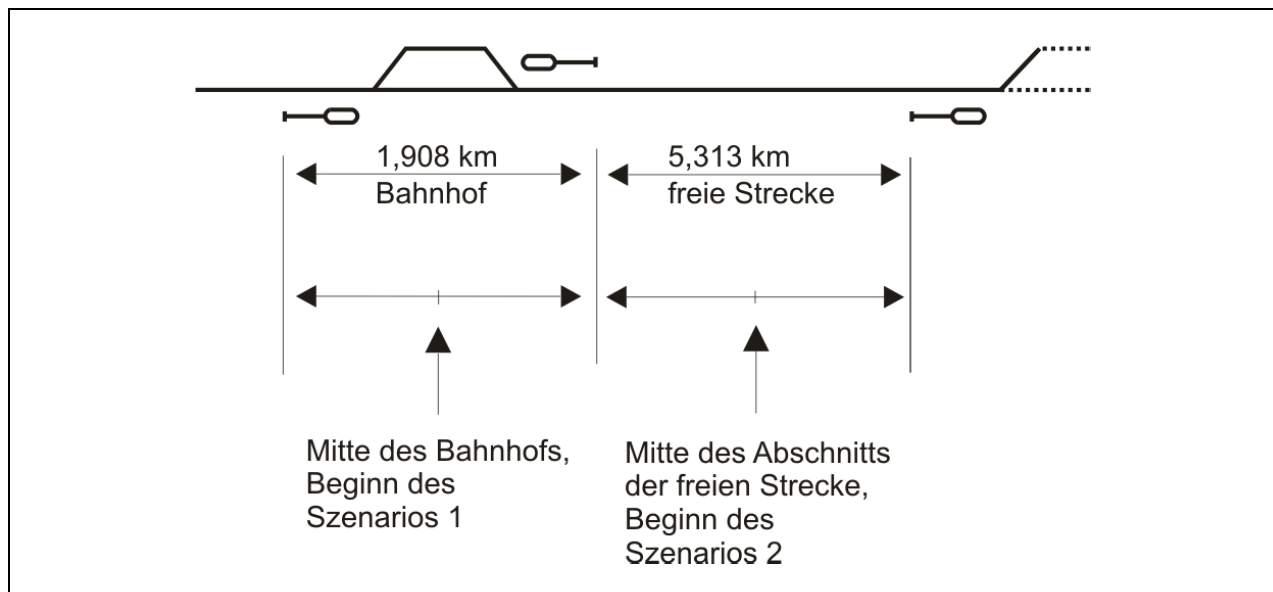


Abbildung 53: Darstellung der beiden Szenarien für den Beginn der Wahrnehmbarkeit eines Lager-Heißläufers durch Personal

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug von Personalen detektiert wurde, in Abhängigkeit zum gefahrenen Weg pro km, wird nachfolgend für Szenario 1 schrittweise berechnet (siehe nachfolgende Tabelle 5).

Schritt 1:

Im ersten Schritt fuhr der Zug ab der Mitte des Bahnhofs bis zum Ende des Bahnhofs. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Zug bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal detektiert wurde, kann aus Formel 46 abgeleitet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit einem Lager-Heißläufer bei der Durchfahrt im Bahnhof durch das dort tätige Personal detektiert wurde

$P110_{\text{Heißläuferdetektion}, Bf}^{\text{Personal}} = 0.25$ wird hierfür halbiert:

Formel 58

$$P131_{S_{Z1}, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt 1}}^{\text{Personal}} = \frac{P110_{\text{Heißläuferdetektion}, Bf}^{\text{Personal}}}{2} = \frac{0,25}{2} = 0,125 \approx 0,13$$

mit:

- $P131_{S_{Z1}, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt 1}}^{\text{Personal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal detektiert wurde nach Szenario 1.

Die Wahrscheinlichkeit $\bar{P}132_{S_{Z1}, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt 1}}^{\text{Personal}}$, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal nicht detektiert wurde, ergibt sich aus der

Formel 59

$$\bar{P}132_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 1}}^{\text{Personal}} = 1 - P131_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 1}}^{\text{Personal}} = 1 - 0,13 = 0,87.$$

Es folgt nun in Kilometerschritten bis zum Ende des freien Streckenabschnitts nach 5,313 km die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug mit Lager-Heißläufer detektiert wurde.

Es wird im zweiten Schritt die Wahrscheinlichkeit $P134_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 2}}^{\text{Personal}}$, mit der der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs (Schritt 1) und 1 km Fahrt auf der freien Strecke detektiert wurde, bestimmt mit:

Formel 60

$$\begin{aligned} \bar{P}133_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 2}}^{\text{Personal}} &= \bar{P}132_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 1}}^{\text{Personal}} - (\bar{P}132_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 1}}^{\text{Personal}} \\ &\quad * P130_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}}^{\text{Personal}}) \\ &= 0,87 - (0,87 * 0,057) \\ &= 0,82 \end{aligned}$$

und

Formel 61

$$P134_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 2}}^{\text{Personal}} = 1 - \bar{P}133_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 2}}^{\text{Personal}} = 1 - 0,82 = 0,18$$

mit:

- $\bar{P}133_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 2}}^{\text{Personal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs (Schritt 1) und 1 km Fahrt auf der freien Strecke nicht detektiert wurde nach Szenario 1.

Es folgt im dritten Schritt die Berechnung der Wahrscheinlichkeit mit der der Zug mit Lager-Heißläufer detektiert wurde bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs und 2 km Fahrt auf der freien Strecke $P136_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 3}}^{\text{Personal}}$:

Formel 62

$$\begin{aligned} \bar{P}135_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 3}}^{\text{Personal}} &= \bar{P}133_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 2}}^{\text{Personal}} - (\bar{P}133_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 2}}^{\text{Personal}} \\ &\quad * P130_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS}}^{\text{Personal}}) \\ &= 0,82 - (0,82 * 0,057) \\ &= 0,77 \end{aligned}$$

und

Formel 63

$$P136_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 3}}^{\text{Personal}} = 1 - \bar{P}135_{S_z1, \text{Heißläuferdetektion, Schritt 3}}^{\text{Personal}} = 1 - 0,77 = 0,23.$$

Die Ergebnisse der weiteren Berechnungsschritte sind in Tabelle 5 enthalten:

Berechnungsschritte			gefährdete Strecke eines Zuges mit Lager-Heißläufer	Detektionswahrscheinlichkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal	Wahrscheinlichkeit der Nichtdetektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal
		Bahnhof	0	0,00	1,00
Schritt 1			0,954	0,13	0,87
Schritt 2			1,954	0,18	0,82
Schritt 3	freie Strecke km 0,954 bis km 6,267		2,954	0,23	0,77
Schritt 4			3,954	0,27	0,73
Schritt 5			4,954	0,31	0,69
Schritt 6			5,954	0,35	0,65
Schritt 7		Bahnhof	6,267	0,36	0,64
Schritt 8			8,175	0,52	0,48
Schritt 9			9,175	0,55	0,45
Schritt 10	freie Strecke km 8,175 bis km 13,488		10,175	0,57	0,43
Schritt 11			11,175	0,60	0,40
Schritt 12			12,175	0,62	0,38
Schritt 13			13,175	0,64	0,36
Schritt 14		Bahnhof	13,488	0,65	0,35
Schritt 15			15,396	0,74	0,26
Schritt 16	freie Strecke km 15,396 bis km 19,396		16,396	0,75	0,25
Schritt 17			17,396	0,77	0,23
Schritt 18			18,396	0,78	0,22
Schritt 19			19,396	0,79	0,21

Tabelle 5: Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 19 des Szenarios 1 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Wahrscheinlichkeitswerten

Bei Schritt 7 ist zu beachten, dass der Wahrscheinlichkeitswert 0,057 auf die Länge von 1 km Fahrt auf der freien Strecke bezogen ist. Da der für Schritt 7 maßgebende Streckenabschnitt jedoch nur eine Länge von 0,313 km umfasst, muss dieser Faktor mit berücksichtigt werden.

$\bar{P}_{Sz1, Heißläuferdetektion, Schritt 7}^{Personal138}$ ist somit die Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs (Schritt 1) und 5,313 km Fahrt auf der freien Strecke nicht detektiert wurde und wird nach der folgenden Formel berechnet.

Formel 64

$$\begin{aligned} \bar{P}_{Sz1, Heißläuferdetektion, Schritt 7}^{Personal138} &= \bar{P}_{Sz1, Heißläuferdetektion, Schritt 6}^{Personal137} - (\bar{P}_{Sz1, Heißläuferdetektion, Schritt 6}^{Personal137} \\ &\quad * P_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS}}^{Personal130} * 0,313) \\ &= 0,65 - (0,65 * 0,057 * 0,313) \\ &= 0,64 \end{aligned}$$

Für das Szenario 2 ergeben sich bei analoger Rechnung die Werte der Tabelle 6.

Berechnungsschritte			gefahrte Strecke eines Zuges mit Lager-Heißläufer	Detektionswahrscheinlichkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal	Wahrscheinlichkeit der Nichtdetektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal
	freie Strecke km 0,000 bis km 2,656		0,000	0,00	1,00
Schritt 1			1,000	0,06	0,94
Schritt 2			2,000	0,11	0,89
Schritt 3		Bahnhof	2,656	0,14	0,86
Schritt 4			4,564	0,36	0,64
Schritt 5	freie Strecke km 4,564 bis km 9,877		5,564	0,39	0,61
Schritt 6			6,564	0,43	0,57
Schritt 7			7,564	0,46	0,54
Schritt 8			8,564	0,49	0,51
Schritt 9			9,564	0,52	0,48
Schritt 10		Bahnhof	9,877	0,53	0,47
Schritt 11			11,785	0,65	0,35
Schritt 12	freie Strecke km 11,785 bis km 17,098		12,785	0,67	0,33
Schritt 13			13,785	0,69	0,31
Schritt 14			14,785	0,70	0,30
Schritt 15			15,785	0,72	0,28
Schritt 16			16,785	0,74	0,26
Schritt 17		Bahnhof	17,098	0,74	0,26
Schritt 18			19,006	0,81	0,19
Schritt 19	freie Strecke km 19,006 bis km 20,006		20,006	0,82	0,18

Tabelle 6: Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 19 des Szenarios 2 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Wahrscheinlichkeitswerten

Da nach der Fahrt durch jeden Abschnitt der freien Strecke bzw. jeden Bahnhof von den bis dahin noch nicht detektierten Zügen mit Lager-Heißläufer durch Personale ein Prozentanteil weiterer Züge detektiert wird, zeigt sich ein asymptotisches Verhalten. Die Detektionswahrscheinlichkeit erreicht den Wert 1 erst im Unendlichen.

In Abbildung 54 sind die Daten aus Tabelle 5 und Tabelle 6 für die Szenarien 1 und 2 dargestellt.

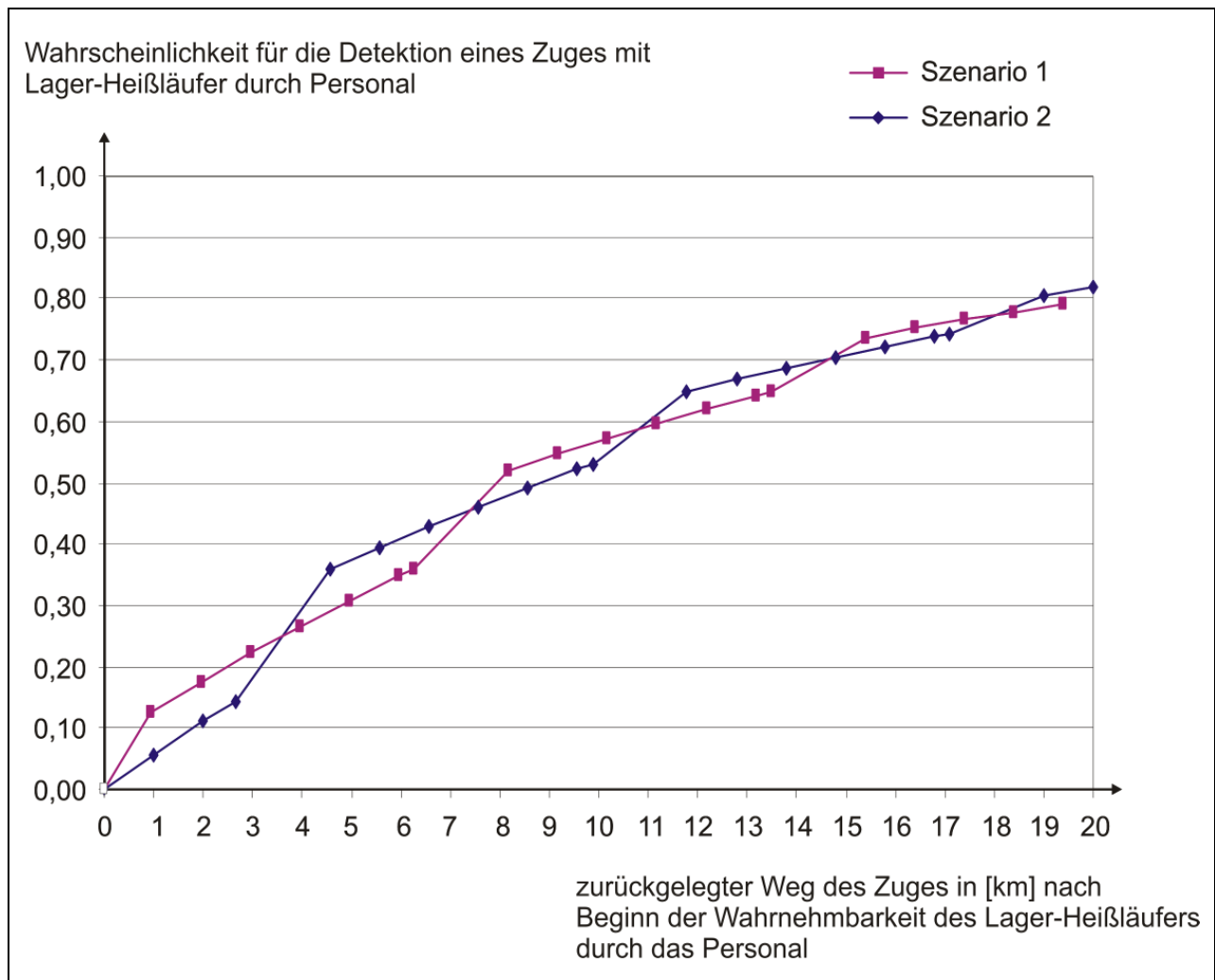


Abbildung 54: Wahrscheinlichkeit für die Detektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer nach dem Beginn dessen Wahrnehmbarkeit durch Personal bei Kilometer 0 in Abhängigkeit von der vom Zug gefahrenen Wegstrecke für die Szenarien 1 und 2

Von entscheidender Bedeutung ist die Stelle, an der die Detektionswahrscheinlichkeit 0,5 erreicht wird. Sie kann interpretiert werden als der Ort, bis zu dem seit Entstehung des Lager-Heißläufers eine einseitige Zugbeobachtung durch das Personal durchgeführt wurde. Die Wahrscheinlichkeit, dass das zugbeobachtende Personal auf der Seite stand, an der der Lager-Heißläufer auftrat und somit vom Personal detektiert werden konnte, beträgt den genannten Wert 0,5. Eingeschlossen ist die Annahme, dass wenn sich das Personal bei einer Zugbeobachtung auf der Seite des sichtbaren Lager-Heißläufers befand, es diesen erkannte.

Im nächsten Schritt wird der Wert des Abstands zwischen dem Beginn des Bahnhofs in km 6,267 und dem Punkt, an dem die Kurve des Szenarios 1 den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht in [km] errechnet. Für das Szenario 1 wird dieser Abstand nach den in Abbildung 55 gezeigten Zusammenhängen beispielhaft ermittelt:

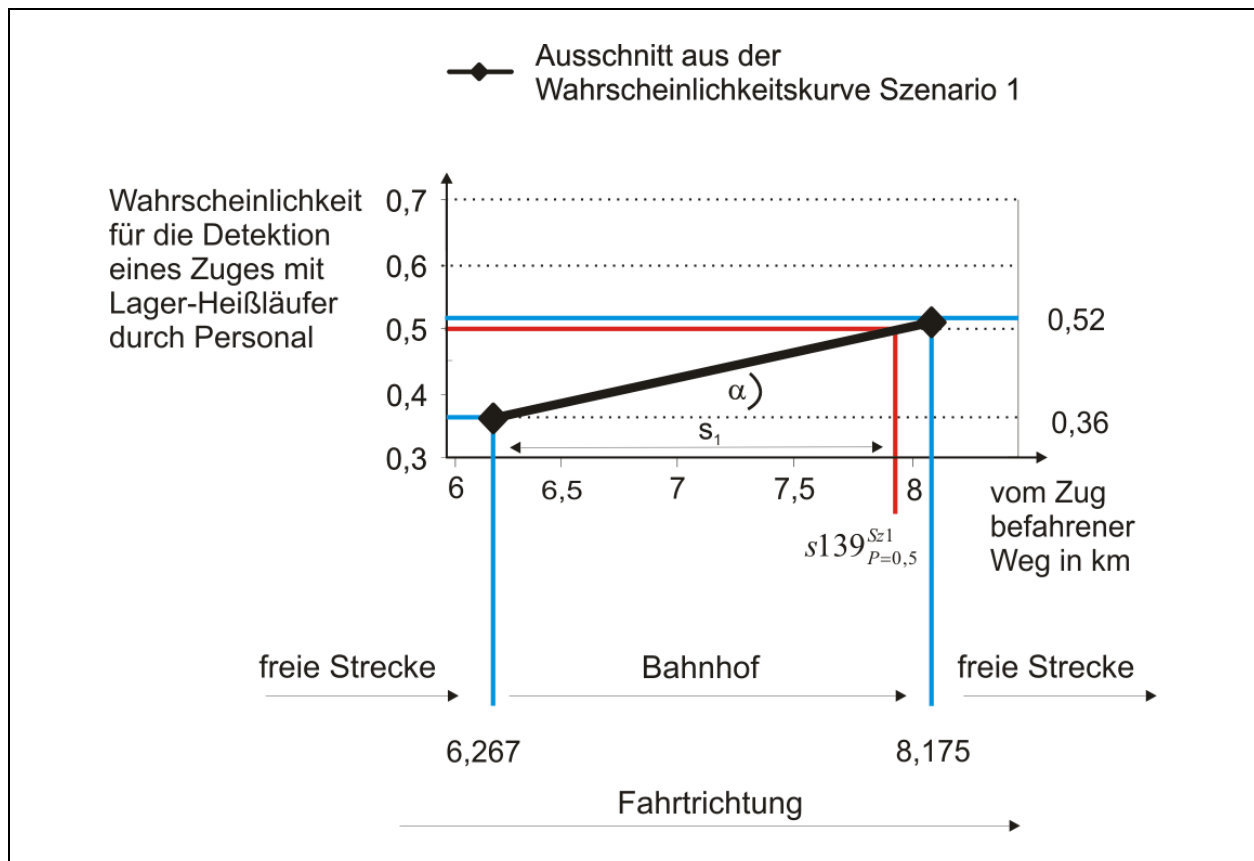


Abbildung 55: Darstellung der Bestimmung des Abstands zwischen dem Beginn der Wahrnehmbarkeit des Lager-Heißläufers bei Szenario 1 (Tabelle 5) und dem Punkt, an dem der Wert der Detektionswahrscheinlichkeit 0,5 erreicht wird

Die Werte aus der Abbildung 55 werden in die Gleichung $y = \Delta m * x + n$ eingesetzt. s_1 entspricht dem Abstand zwischen dem Punkt (6,267; 0,36) aus Tabelle 5 und dem Punkt, an dem die Kurve den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht.

Es ergeben sich für Δm und n :

$$0,52 = \Delta m * 8,175 + n;$$

$$0,36 = \Delta m * 6,267 + n;$$

$$\Delta m = 0,084; n = -0,167$$

sowie für

Formel 65

$$x_{0,5} = s139_{P=0,5}^{S_z1} = \frac{(0,5 - (-0,167))}{0,084} = 7,94 \text{ km}$$

mit:

- $s139_{P=0,5}^{S_z1}$ = Abstand zwischen dem Beginn des Szenarios 1 und dem Punkt, an dem die Kurve den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht in [km].

	Abstand zwischen dem Beginn des Szenarios und dem Punkt, an dem die Detektionswahrscheinlichkeit den Wert 0,5 erreicht
Szenario 1	$s139_{P=0,5}^{S_z 1} = 7,94 \text{ km}$
Szenario 2	$s140_{P=0,5}^{S_z 2} = 8,897 \text{ km}$

Tabelle 7: Darstellung des Abstands zwischen dem Beginn der Zugfahrt mit Lager-Heißläufer und dem Punkt, an dem die Kurve aus Abbildung 54 den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht in [km] für die Szenarien 1 und 2

Der Abstand zwischen dem Beginn der Zugfahrt mit wahrnehmbarem Lager-Heißläufer bei Szenario 2 und dem Punkt, an dem die Detektionswahrscheinlichkeit den Wert 0,5 erreicht, ist in Tabelle 7 enthalten.

Die Bestimmung des mittleren Abstandes zwischen dem Beginn der Zugfahrt mit wahrnehmbarem Lager-Heißläufer und dem Punkt, an dem die Kurve den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht, erfolgt über beide Szenarien in Formel 66. Dazu wird der mittlere Abstand berechnet:

- zwischen dem Beginn der Zugfahrt mit wahrnehmbarem Lager-Heißläufer und
- dem Punkt, an dem die Detektionswahrscheinlichkeit den Wert 0,5 erreicht

für die jeweiligen Szenarien, gewichtet um den Faktor mit dem Wert der Länge des Bahnhofs (Szenario 1) bzw. der Länge der freien Strecke (Szenario 2). Die Gewichtung ist notwendig, da ein Zug im Szenario 1, bei dem die Zugfahrt mit wahrnehmbarem Lager-Heißläufer im Bahnhof beginnt, nach 7,94 km durch Personal mit der Wahrscheinlichkeit 0,5 detektiert wird und im Szenario 2, bei dem die Zugfahrt mit Lager-Heißläufer auf der freien Strecke wahrnehmbar wird nach 8,897 km. Wegen der unterschiedlichen Länge der Abschnitte im Bahnhof und auf der Strecke (Abbildung 52) sind diese ebenfalls als Gewichtungsfaktor in Formel 66 zu berücksichtigen:

Formel 66

$$s141_{P=0,5}^{S_z 1-2} = \frac{s139_{P=0,5}^{S_z 1} * 1,908 + s140_{P=0,5}^{S_z 2} * 5,313}{7,221} = \frac{7,94 \text{ km} * 1,908 + 8,897 \text{ km} * 5,313}{7,221} = 8,644 \text{ km}$$

mit:

- $s141_{P=0,5}^{S_z 1-2}$ = mittlerer Abstand zwischen dem Beginn der Wahrnehmbarkeit des Lager-Heißläufers und dem Punkt, an dem die Kurve den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht, über beide Szenarien in [km],

- 1,908 = Gewichtungsfaktor in der Größe der durchschnittlichen Betriebslänge eines Bahnhofs (Formel 43),
- 5,313 = Gewichtungsfaktor in der Größe der durchschnittlichen Länge eines Abschnitts der freien Strecke zwischen zwei Bahnhöfen (Formel 47),
- 7,221 = Gewichtungsfaktor in der Größe der durchschnittlichen Betriebslänge eines Abschnitts der freien Strecke und eines Bahnhofs (Abbildung 52).

Es kann davon ausgegangen werden, dass nach der oben gezeigten Rechnung im Mittel nach 8,644 km ein Zug mit Lager-Heißläufer mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 durch Personal detektiert worden ist. Der Wert ist wichtiger Bestandteil für die nachfolgende Abschätzung, in welchem Abstand HOA errichtet werden müssen.

5.2 Ableitung des Abstandes von HOA auf Grundlage der Lager-Heißläuferdetektion durch Personal im Jahr 1983 nach dem realistischen Ansatz

In diesem Kapitel wird die Frage betrachtet, in welchem Kilometerintervall HOA installiert werden müssen, um die seit 1983 wegfallenden Personale vor Ort zu kompensieren und mindestens die gleiche Detektionshäufigkeit zu erreichen.

Für die Abschätzung des Abstandes zwischen zwei HOA sind zwei Fragen zu klären:

1. Wie entwickelt sich die Temperatur bei einem Lager-Heißläufer in Abhängigkeit zum gefahrenen Weg?
2. In welchem Kilometerintervall sind HOA in Ableitung von Frage 1. zu errichten?

Mit der Temperaturzunahme bei einem Lager-Heißläufer in Abhängigkeit von dem vom betroffenen Zug gefahrenen Weg befasst sich [SCHÖ 2005]. Es werden drei Szenarien betrachtet, die jeweils durch eine Exponentialfunktion der Form:

Formel 67

$$y = a * e^{bx}$$

beschrieben werden. Es handelt sich hierbei um:

1. das Szenario „Beobachtung“, welches aus Beobachtungen hergeleitet wurde,
2. das Szenario „worst case“, welches den schnellsten angenommenen Anstieg der Temperatur des beschädigten Bauteils beinhaltet und

3. das Szenario „Bemessung“, welches nach [SCHÖ 2005] eine realistische Abschätzung darstellt.

Szenario	Absoluttemperaturen	Differenztemperaturen
Beobachtung	$y = 53,8 * e^{0,0196 \cdot x}$	$y = 18 * e^{0,0566 \cdot x}$
worst case	$y = 85 * e^{0,037 \cdot x}$	$y = 33 * e^{0,1351 \cdot x}$
Bemessung	$y = 69 * e^{0,04 \cdot x}$	$y = 49 * e^{0,15 \cdot x}$

Tabelle 8: Gleichung zur Berechnung der Absolut- und Differenztemperaturen der drei Szenarien nach [SCHÖ 2005]

Für jedes der drei Szenarien wird jeweils eine Gleichung zur Verfügung gestellt, aus der das Erreichen der Regelalarmschwelle des Heißalams und des Alarms „Differenz Heiß“ ermittelt werden kann (Tabelle 8).

Für die Größen in der Formel 67 sind in [SCHÖ 2005] keine Einheiten angegeben. Es lassen sich jedoch aus dem Sinnzusammenhang folgende Einheiten herleiten:

- y = Temperatur des Lager-Heißläufers in [$^{\circ}\text{C}$],
- a = Vorfaktor in [$^{\circ}\text{C}$],
- b = Exponent in [$\frac{1}{\text{km}}$],
- x = gefahrener Weg des Zuges mit Lager-Heißläufer in [km].

km	Szenario "Beob- achtung" Absolut- temperatur in °C	Szenario "Beob- achtung" Differenz- temperatur in K	Szenario "worst case" Ab- solut- temperatur in °C	Szenario "worst ca- se" Diffe- renz- temperatur in K	Szenario "Be- messung" Absolut- temperatur in °C	Szenario "Bemes- sung" Diffe- renz- temperatur in K
0,000	54	18	85	33	69	49
0,359	54	18	86	35	70	52
1,884	56	20	91	43	74	65
4,392	59	23	100	60	82	
5,018	59	24	102	65	84	
9,276	65	30	120		100	
10,000	65	32	123		103	
11,483	67	34	130		109	
13,430	70	38	140		118	
15,000	72	42	148		126	
15,836	73	44	153		130	
20,000	80	56	178		154	
22,685	84	65	197		171	
25,000	88		214		188	
30,000	97		258		229	
31,627	100		274		244	
35,000	107		310		280	
40,000	118		373		342	
45,000	130		449		417	
49,201	141		525		494	
50,000	143				510	
50,732	145				525	
100,000	382					
116,231	525					

Tabelle 9: Darstellung der Szenarien „Beobachtung“, „worst case“ und „Bemessung“ nach den in [SCHÖ 2005] angegebenen Gleichungen; Temperaturen, ab denen der Mensch Lager-Heißläufer detektieren kann, sind blau gekennzeichnet; Temperaturen, ab denen die HOA einen Alarm auslöst in Abhängigkeit zur Außentemperatur: 0 °C rote Zahl, +30 °C braune Zahl, -30 °C grüne Zahl; Temperaturdifferenzen, ab denen eine HOA einen Alarm „Differenz Heiß“ auslöst, sind ebenfalls rot dargestellt

Die Tabelle 9 zeigt, dass nach dem Auftreten des Lager-Heißläufers die Temperatur im Bereich des Defektes die Alarmschwellen des Heißalarms bei 0 °C Außentemperatur nach:

- 4,392 km bei Szenario „worst case“,
- 9,276 km bei Szenario „Bemessung“,
- 31,627 km bei Szenario „Beobachtung“

übersteigt und somit von einer HOA detektierbar wird. Die Werte in der Spalte „km“ der Tabelle 9 erhöhen sich bis Kilometer 50 in Schritten von 5 km. Zwischenliegende km-Werte wurden so gewählt, dass die Regelalarmschwellen (farbige Zahlen) gezeigt werden.

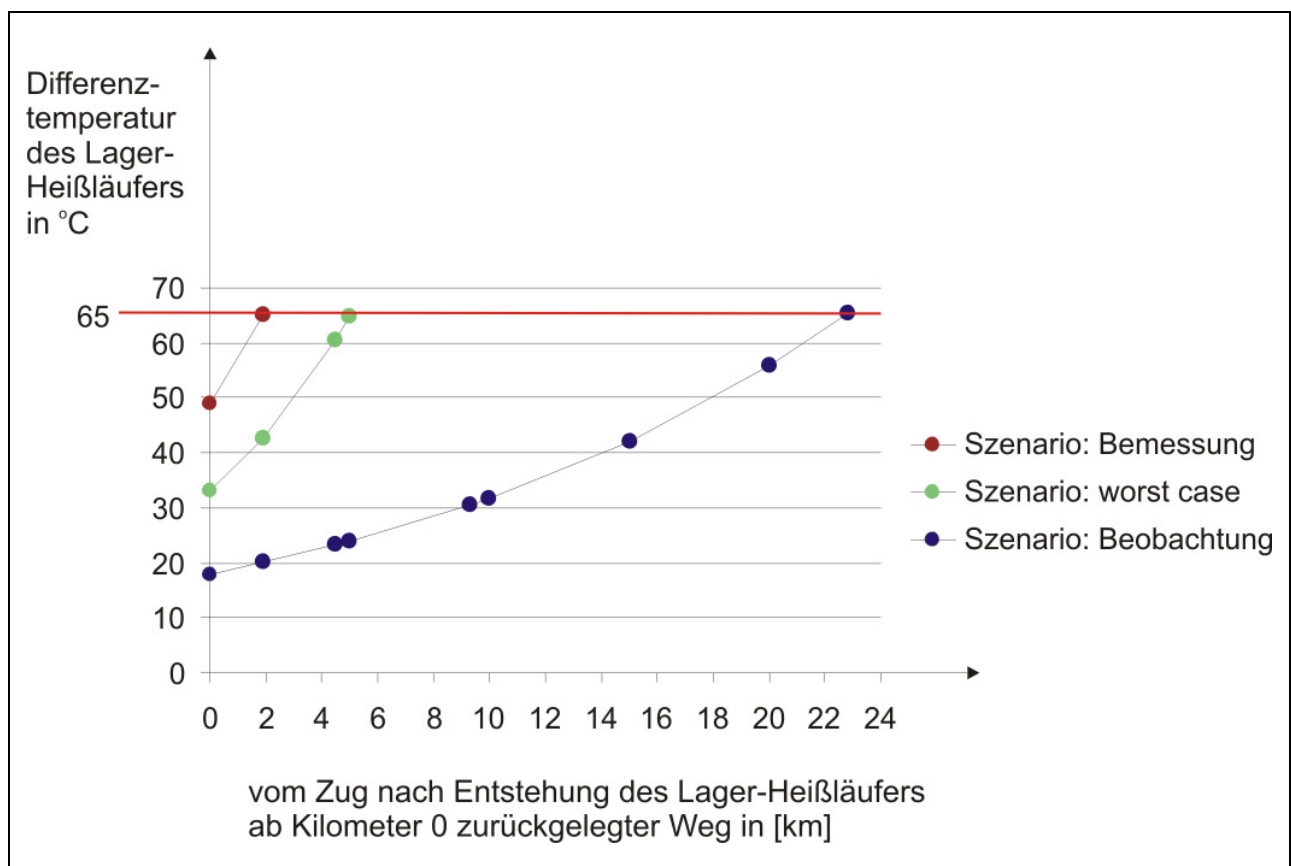


Abbildung 56: Entwicklung der Temperaturen des Differenzalarms der drei Szenarien in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg nach Entstehung des Lager-Heißläufers

Die Alarmschwellen für die Differenzalarms der Szenarien liegen nach Tabelle 9 und Abbildung 56 bei:

- 5,018 km bei Szenario „worst case“,
- 1,884 km bei Szenario „Bemessung“,
- 22,685 km bei Szenario „Beobachtung“.

Zu hinterfragen ist, warum die Regelalarmschwelle zum Alarm „Differenz Heiß“ beim Szenario „Bemessung“ bezüglich des zurückgelegten Weges des Zuges nach Entstehung des Lager-Heißläufers eher erreicht wird als beim Szenario „worst case“. Da der Mensch den Zug nicht gleichzeitig auf beiden Zugseiten beobachten kann und somit keine Differenztemperaturen im Zusammenhang mit Lager-Heißläufern wahrnehmen kann, ist eine Betrachtung der Temperaturen oberhalb des Alarms „Differenz Heiß“ nicht sinnvoll.

Daher wird nachfolgend die Entwicklung der Absoluttemperatur des Bemessungsszenarios als maßgebend angenommen. Die Temperatur der Regelalarmschwelle des Lager-Heißläufers der HOA wird bei einer Außentemperatur von 0 °C nach 9,276 km Fahrt des Zuges nach Entstehung des Lager-Heißläufers erreicht. Da der Heißalarm von der Außentemperatur abhängig ist, muss ein Temperaturintervall festgelegt werden, in dem die Fahrzeuge verkehren. Dieses wird nachfolgend für den Temperaturbereich von -30 °C und +30 °C angenommen, da dieser die in Deutschland vorherrschenden Temperaturen abdeckt.

Für -30 °C Außentemperatur beträgt dieser Wert 0,359 km und bei +30 °C liegt der Wert bei 15,836 km (siehe Tabelle 9). Grundlage hierfür ist das Szenario „Bemessung“. Die Entfernung ab der Entstehung des Lager-Heißläufers bis zum Erreichen der Absolutalarmschwelle lässt sich mit den Werten $9,276 \text{ km} \begin{smallmatrix} +6,560 \text{ km} \\ -8,917 \text{ km} \end{smallmatrix}$ bei einer Außentemperatur von $0^\circ \text{ C} \begin{smallmatrix} +30^\circ \text{ C} \\ -30^\circ \text{ C} \end{smallmatrix}$ darstellen.

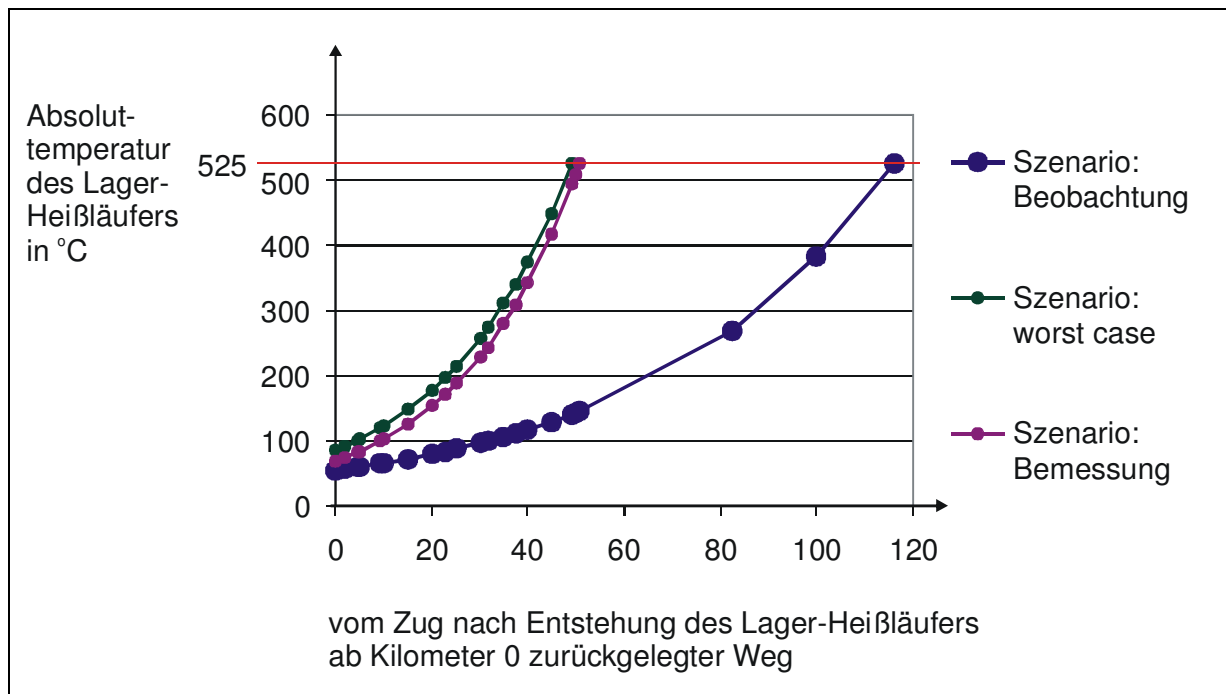


Abbildung 57: Entwicklung der Lager-Heißläufertemperaturen der drei Szenarien in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg nach Entstehung des Lager-Heißläufers nach Tabelle 9 bis zur Detektierbarkeit durch den Menschen ab 525 °C

Der Mensch kann den Lager-Heißläufer bei beginnender Rotglut detektieren, welche gemäß Tabelle 9 und Abbildung 57 einsetzt nach:

- 49,201 km (Szenario „worst case“),
- 50,732 km (Szenario „Bemessung“) und
- 116,231 km (Szenario „Beobachtung“).

Die Summation mit dem Wert 8,644 km (Formel 66) ergibt die Entfernung, nach der ein Zug nach der Entstehung des Lager-Heißläufers durch Personal einseitig detektiert wurde:

- 57,845 km (Szenario „worst case“),
- 59,376 km (Szenario „Bemessung“),
- 124,875 km (Szenario „Beobachtung“).

Auch hier wird das Bemessungsszenario als maßgebend angesehen. Das Kilometerintervall zur Ausrüstung der Strecken mit HOA ist nach dem realistischen Ansatz so zu wählen, dass eine Detektion 59,376 km nach der Entstehung des Lager-Heißläufers erfolgt. Abzüglich des Wertes $9,276 \text{ km}^{+6,560 \text{ km}}_{-8,917 \text{ km}}$ (Tabelle 9), die der Zug mit Lager-Heißläufer seit dessen Entstehung bis zur Detektierbarkeit durch eine HOA zurückgelegt hat, folgt ein maximaler Abstand zwischen zwei HOA von $50,1 \text{ km}^{-6,560 \text{ km}}_{+8,917 \text{ km}}$ d. h. zwischen 43,54 km und 59,017 km.

5.3 Ableitung des Abstandes von HOA nach dem pessimistischen Ansatz

Nachfolgend soll untersucht werden, wie sich der in dieser Arbeit errechnete Abstand zwischen zwei HOA verändert, wenn man hinsichtlich der im Jahr 1983 erfolgten Zugbeobachtung durch den Betriebsbeamten einen bewusst pessimistischen Ansatz wählt. Ziel ist es zu quantifizieren, wie sich der notwendige Abstand zwischen zwei HOA verändert, wenn von einer derart geringen Häufigkeit der Zugbeobachtung durch Betriebsbeamte ausgegangen wird, die als untere Grenze der Verhältnisse im Jahr 1983 betrachtet werden kann.

Für den pessimistischen Ansatz werden folgende Festlegungen für Zugbeobachtungen im Bahnhof getroffen. Die Wahrscheinlichkeit $P111^{Personal}_{Zugbeobachtung, Bf} = 0,5$ (Formel 46), dass ein Zug bei der Fahrt durch den Bahnhof von einem Zugbeobachter beobachtet wurde, wird für den pessimistischen Ansatz auf 0,1 gesenkt. Der Wert bleibt innerhalb derselben Zehnerpotenz und wird als untere Schranke an deren unterem Ende festgelegt. Der Wert beinhaltet die Annahme, dass Betriebsbeamte in Bahnhöfen bei neun von 10 vorbeifahrenden Zügen ihrer Pflicht zur Beobachtung nicht

nachgekommen sind bzw. aus örtlichen Gründen, wie z. B. aufgrund eingeschränkter Sicht, nicht nachkommen konnten. Formelzeichen, deren Zahlenwerte sich gegenüber den vorangegangenen Ausführungen nun im Rahmen des pessimistischen Ansatzes ändern, erhalten zusätzlich den Index „pess“. Für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug bei der Fahrt durch den Bahnhof von einem Zugbeobachter beobachtet wurde, ergibt sich somit $P142_{\text{Zugbeobachtung, Bf, pess}}^{\text{Personal}} = 0,1$.

Für den pessimistischen Ansatz sind für Zugbeobachtungen auf der freien Strecke weitere Festlegungen zu treffen.

Die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die in Kapitel 5.1 genannten Betriebsbeamten der freien Strecke Zugbeobachtungen durchführten, werden für den pessimistischen Ansatz ebenfalls reduziert. Dies gilt sowohl für Betriebsbeamte auf Stellwerken der freien Strecke wie auch für am Bahnübergang tätige Personale als auch für Betriebsbeamte der PVA-fS.

Die Wahrscheinlichkeit $P118_{\text{Zugbeobachtung, Stw, fS}}^{\text{Stellwerkspersonal}} = 0,5$, dass der Zug bei der Vorbeifahrt an einem Stellwerk der freien Strecke von einem Stellwerksmitarbeiter beobachtet wurde, wird für den pessimistischen Ansatz gesenkt auf $P143_{\text{Zugbeobachtung, Stw, fS, pess}}^{\text{Stellwerkspersonal}} = 0,1$.

Ebenfalls gesenkt wird die Wahrscheinlichkeit $P128_{\text{Zugbeobachtung, PVA-fS}}^{\text{Personal der PVA-fS}} = 0,5$ (Formel 53), dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einer PVA-fS von dessen Personal beobachtet wurde, auf $P144_{\text{Zugbeobachtung, PVA-fS, pess}}^{\text{Personal der PVA-fS}} = 0,1$.

Als letzte Wahrscheinlichkeit für den pessimistischen Ansatz wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einem Bahnübergang der freien Strecke von dessen Personal beobachtet wurde $P123_{\text{Zugbeobachtung, PBÜ, fS}}^{\text{PBÜ-Personal}} = 1$ reduziert. Als sinnvolle Annahme für die untere Grenze wird festgelegt, dass jeder zweite Zug durch den Betriebsbeamten beobachtet wurde. Demzufolge ergibt sich $P145_{\text{Zugbeobachtung, PBÜ, fS, pess}}^{\text{PBÜ-Personal}} = 0,5$.

Mit den neu festgelegten Wahrscheinlichkeiten wird nachfolgend die Detektionshäufigkeit eines Zuges durch den Menschen entsprechend Kapitel 5.1 berechnet und der Abstand von HOA auf Grundlage der Lager-Heißläuferdetektion durch Personal im Jahr 1983 nach Kapitel 5.2 abgeleitet.

5.3.1 Detektion von Lager-Heißläufern durch Betriebsbeamte im Bahnhof vor Einführung der HOA nach dem pessimistischen Ansatz

Die Wahrscheinlichkeit $P146_{\text{Heißläuferdetektion, Bf, pess}}^{\text{Personal}}$, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei der Durchfahrt im Bahnhof durch das dort tätige Personal detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz, ist wie folgt zu ermitteln:

Formel 68

$$P146_{\text{Heißläuferdetektion, Bf, pess}}^{\text{Personal}} = P142_{\text{Zugbeobachtung, Bf, pess}}^{\text{Personal}} * P112_{\text{Standort auf Heißläuferseite, Bf}}^{\text{Personal}} = 0,1 * 0,5 = 0,05$$

mit:

- $P142_{\text{Zugbeobachtung, Bf, pess}}^{\text{Personal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug bei der Fahrt durch den Bahnhof von einem Zugbeobachter beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3),
- $P112_{\text{Standort auf Heißläuferseite, Bf}}^{\text{Personal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich das zugbeobachtende Personal im Bahnhof auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 46).

5.3.2 Zugbeobachtung von Betriebsbeamten vor Ort vor Einführung der HOA auf der freien Strecke nach dem pessimistischen Ansatz

Die Wahrscheinlichkeit $P147_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess}}^{\text{Stellwerkspersonal}}$, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke durch einen Stellwerksmitarbeiter detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz, kann ermittelt werden unter Abwandlung der Formel 49:

Formel 69

$$P147_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess}}^{\text{Stellwerkspersonal}} = \frac{P143_{\text{Zugbeobachtung, Stw, fS, pess}}^{\text{Stellwerkspersonal}} * P119_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}^{\text{Stellwerkspersonal}}}{72,410}$$

$$= \frac{0,1 * 0,5}{72,410} = 7 * 10^{-4}$$

mit:

- $P143_{\text{Zugbeobachtung, Stw, fS, pess}}^{\text{Stellwerkspersonal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug bei der Vorbeifahrt an einem Stellwerk der freien Strecke von einem Stellwerksmitarbeiter beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3),
- $P119_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}^{\text{Stellwerkspersonal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich der Stellwerksmitarbeiter der freien Strecke auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 49),
- 72,410 = Normierungsgröße mit dem Wert der durchschnittlichen Entfernung zwischen zwei Stellwerken bezogen auf die freie Strecke, abgeleitet aus Formel 48.

Die Wahrscheinlichkeit $P148_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess}}^{\text{PBÜ - Personal}}$, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke von Personal am Bahnübergang detektiert wurde, errechnet sich unter Nutzung der Formel 51, jedoch nun mit den Werten für den pessimistischen Ansatz:

Formel 70

$$P148^{\text{PBÜ-} \text{Personal}}_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess}} = \frac{P145^{\text{PBÜ-} \text{Personal}}_{\text{Zugbeobachtung, PBÜ, fS, pess}} * P124^{\text{PBÜ-} \text{Personal}}_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}}{9,898} = \frac{0,5 * 0,5}{9,898} = 0,025$$

mit:

- $P145^{\text{PBÜ-} \text{Personal}}_{\text{Zugbeobachtung, PBÜ, fS, pess}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einem Bahnübergang der freien Strecke von dessen Personal beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3),
- $P124^{\text{PBÜ-} \text{Personal}}_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich das Personal am Bahnübergang der freien Strecke bei der Zugbeobachtung auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 51),
- 9,898 = Normierungsgröße mit dem Wert der durchschnittlichen Entfernung zwischen zwei mit Personal besetzten Bahnübergängen, bezogen auf die freie Strecke, abgeleitet aus Formel 50.

Die Wahrscheinlichkeit $P149^{\text{Personal der PVA-fS}}_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess}}$, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke vom Personal einer PVA-fS detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz, errechnet sich in Anlehnung an Formel 53:

Formel 71

$$P149^{\text{Personal der PVA-fS}}_{\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess}} = \frac{P144^{\text{Personal der PVA-fS}}_{\text{Zugbeobachtung, PVA-fS, pess}} * P129^{\text{Personal der PVA-fS}}_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}}{79,069}$$

$$= \frac{0,1 * 0,5}{79,069} = 6 * 10^{-4}$$

mit:

- $P144^{\text{Personal der PVA-fS}}_{\text{Zugbeobachtung, PVA-fS, pess}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einer PVA-fS von dessen Personal beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3),
- $P129^{\text{Personal der PVA-fS}}_{\text{Standort auf Heißläuferseite, fS}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass sich das Personal der PVA-fS auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 53),
- 79,069 = Normierungsgröße mit dem Wert der durchschnittlichen Entfernung zwischen zwei PVA-fS (Formel 52).

Die Zusammenführung der Detektionswahrscheinlichkeiten pro km der drei betrachteten Einrichtungen:

- der Stellwerke auf der freien Strecke,
- der mit Personal besetzten Bahnübergänge und
- der mit Personal besetzten Personenverkehrsanlagen der freien Strecke

ergibt die Wahrscheinlichkeit $P150^{Personal}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}$, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro gefahrenem Kilometer der freien Strecke durch Personal detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz nach:

Formel 72

$$x1 = (1 - P149^{Personal \text{ der PVA-fS}}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}) = 1 - 6 * 10^{-4} = 0,9994$$

Formel 73

$$x2 = x1 * (1 - P148^{PBÜ - Personal}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}) = 0,9994 * (1 - 0,025) = 0,974$$

Formel 74

$$x3 = x2 * (1 - P147^{Stellwerkpersonal}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}) = 0,974 * (1 - 7 * 10^{-4}) = 0,973$$

Formel 75

$$P150^{Personal}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}} = 1 - x3 = 1 - 0,973 = 0,027$$

mit:

- $P149^{Personal \text{ der PVA-fS}}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}$ = Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke vom Personal einer PVA-fS detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 71),
- $P148^{PBÜ - Personal}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}$ = Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke von Personal am Bahnübergang detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 70),
- $P147^{Stellwerkpersonal}_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke durch einen Stellwerksmitarbeiter detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 69),
- $x1, x2$ und $x3$ = Hilfsvariablen.

5.3.3 Detektionshäufigkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch den Menschen nach dem pessimistischen Ansatz

Wie in Kapitel 5.2 wird nun errechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Zug mit Lager-Heißläufer in Abhängigkeit der gefahrenen Wegstrecke vom Personal detektiert wurde, jedoch hier für den pessimistischen Ansatz mithilfe der zwei Szenarien:

- Szenario 1: Der Lager-Heißläufer wird wahrnehmbar, während der Zug durch den Bahnhof fährt,
- Szenario 2: Der Lager-Heißläufer wird wahrnehmbar, während der Zug auf der freien Strecke fährt.

Es wird wie in Kapitel 5.2 angenommen, dass die Lager-Heißläufer bei der Fahrt des Zuges gleich verteilt auftreten gemäß Abbildung 53.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug von Personalen detektiert wurde, in Abhängigkeit zur gefahrenen Strecke pro km nach dem pessimistischen Ansatz, wird nachfolgend für Szenario 1 berechnet. In den nachfolgenden Berechnungen zu den Szenarien 1 und 2 des pessimistischen Ansatzes wird im Index der Formelzeichen das Szenario mit dem Kürzel „Sz1, pess“ bzw. „Sz2, pess“ kenntlich gemacht.

Im ersten Schritt fährt der Zug mit dem in der Mitte des Bahnhofs auftretenden Lager-Heißläufer bis zum Ende des Bahnhofs. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit einem Lager-Heißläufer bei der Durchfahrt im Bahnhof durch das dort tätige Personal detektiert wurde $P146_{\text{Heißläuferdetektion, Bf, pess}}^{\text{Personal}} = 0,05$ (Formel 68), ist hierfür zu halbieren:

Formel 76

$$P151_{\text{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}}^{\text{Personal}} = \frac{P146_{\text{Heißläuferdetektion, Bf, pess}}^{\text{Personal}}}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,025$$

mit:

- $P151_{\text{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}}^{\text{Personal}}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz.

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal nicht detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz $\bar{P}152_{\text{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}}^{\text{Personal}}$ ergibt sich aus:

Formel 77

$$\begin{aligned}\bar{P}152_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}^{Personal} &= 1 - P151_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}^{Personal} \\ &= 1 - 0,025 = 0,975 \approx 0,98\end{aligned}$$

Es folgt nun in Kilometerschritten bis zum Ende des freien Streckenabschnitts nach 5,313 km die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug mit Lager-Heißläufer detektiert wurde.

Schritt 2:

Es ist die Wahrscheinlichkeit $P154_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 2}^{Personal}$, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs und nach weiterer 1 km Fahrt auf der freien Strecke durch Personal detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz zu bestimmen nach:

Formel 78

$$\begin{aligned}\bar{P}153_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 2}^{Personal} &= \bar{P}152_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}^{Personal} - (\bar{P}152_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}^{Personal} * \\ P150_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}^{Personal}) \\ &= 0,98 - (0,98 * 0,027) \\ &= 0,95\end{aligned}$$

und nach

Formel 79

$$P154_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 2}^{Personal} = 1 - \bar{P}153_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 2}^{Personal} = 1 - 0,95 = 0,05$$

mit:

- $\bar{P}153_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 2}^{Personal}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs und nach weiterer 1 km Fahrt auf der freien Strecke durch Personal nicht detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz,
- $\bar{P}152_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1}^{Personal}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal nicht detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz (Formel 77),
- $P150_{Heißläuferdetektion \text{ pro km, fS, pess}}^{Personal}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro gefahrenem Kilometer der freien Strecke durch Personal detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 75).

Die Ergebnisse der weiteren Schritte für das Szenario 1 sind in der Tabelle 10 enthalten. Für das Szenario 2 sind die Ergebnisse der Berechnungsschritte in Tabelle 11 dargestellt.

Berechnungsschritte			gefahrte Strecke eines Zuges mit Lager-Heißläufer	Detektionswahrscheinlichkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal	Wahrscheinlichkeit der Nichtdetektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal
		Bahnhof	0,000	0,00	1,00
Schritt 1			0,954	0,02	0,98
Schritt 2	freie Strecke km 0,954 bis km 6,267		1,954	0,05	0,95
Schritt 3			2,954	0,08	0,92
Schritt 4			3,954	0,10	0,90
Schritt 5			4,954	0,13	0,87
Schritt 6			5,954	0,15	0,85
Schritt 7		Bahnhof	6,267	0,16	0,84
Schritt 8			8,175	0,20	0,80
Schritt 9	freie Strecke km 8,175 bis km 13,488		9,175	0,22	0,78
Schritt 10			10,175	0,24	0,76
Schritt 11			11,175	0,26	0,74
Schritt 12			12,175	0,28	0,72
Schritt 13			13,175	0,30	0,70
Schritt 14		Bahnhof	13,488	0,31	0,69
Schritt 15			15,396	0,34	0,66
Schritt 16	freie Strecke km 15,396 bis km 20,709		16,396	0,36	0,64
Schritt 17			17,396	0,38	0,62
Schritt 18			18,396	0,39	0,61
Schritt 19			19,396	0,41	0,59
Schritt 20			20,396	0,43	0,57
Schritt 21		Bahnhof	20,709	0,43	0,57
Schritt 22			22,617	0,46	0,54
Schritt 23	freie Strecke km 22,617 bis km 27,617		23,617	0,47	0,53
Schritt 24			24,617	0,49	0,51
Schritt 25			25,617	0,50	0,50
Schritt 26			26,617	0,52	0,48
Schritt 27			27,617	0,53	0,47

Tabelle 10: Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 27 des Szenarios 1 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Wahrscheinlichkeitswerten nach dem pessimistischen Ansatz

Berechnungsschritte			gefahrte Strecke eines Zuges mit Lager-Heißläufer	Detektionswahrscheinlichkeit eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal	Wahrscheinlichkeit der Nichtdetektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer durch Personal
	freie Strecke km 0,000 bis km 2,656		0,000	0,00	1,00
Schritt 1			1,000	0,03	0,97
Schritt 2			2,000	0,05	0,95
Schritt 3		Bahnhof	2,656	0,07	0,93
Schritt 4			4,564	0,12	0,88
Schritt 5	freie Strecke km 4,564 bis km 9,877		5,564	0,14	0,86
Schritt 6			6,564	0,16	0,84
Schritt 7			7,564	0,19	0,81
Schritt 8			8,564	0,21	0,79
Schritt 9			9,564	0,23	0,77
Schritt 10		Bahnhof	9,877	0,24	0,76
Schritt 11			11,785	0,27	0,73
Schritt 12	freie Strecke km 11,785 bis km 17,098		12,785	0,28	0,72
Schritt 13			13,785	0,30	0,70
Schritt 14			14,785	0,32	0,68
Schritt 15			15,785	0,34	0,66
Schritt 16			16,785	0,36	0,64
Schritt 17		Bahnhof	17,098	0,37	0,63
Schritt 18			19,006	0,40	0,60
Schritt 19	freie Strecke km 19,006 bis km 24,319		20,006	0,42	0,58
Schritt 20			21,006	0,44	0,56
Schritt 21			22,006	0,45	0,55
Schritt 22			23,006	0,47	0,53
Schritt 23			24,006	0,48	0,52
Schritt 24		Bahnhof	24,319	0,48	0,52
Schritt 25			26,227	0,51	0,49
Schritt 26	freie Strecke km 26,227 bis km 28,227		27,227	0,52	0,48
Schritt 27			28,227	0,54	0,46

Tabelle 11: Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 27 des Szenarios 2 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Werten nach dem pessimistischen Ansatz

Da auch beim pessimistischen Ansatz nach der Fahrt durch jeden Abschnitt der freien Strecke bzw. jeden Bahnhof von den bis dahin noch nicht detektierten Zügen mit Lager-Heißläufer ein Prozentanteil weiterer Züge durch Personale detektiert wird, zeigt sich wie beim realistischen Ansatz ein asymptotisches Verhalten.

In Abbildung 58 sind die Daten aus der Tabelle 10 und Tabelle 11 für die Szenarien 1 und 2 dargestellt.

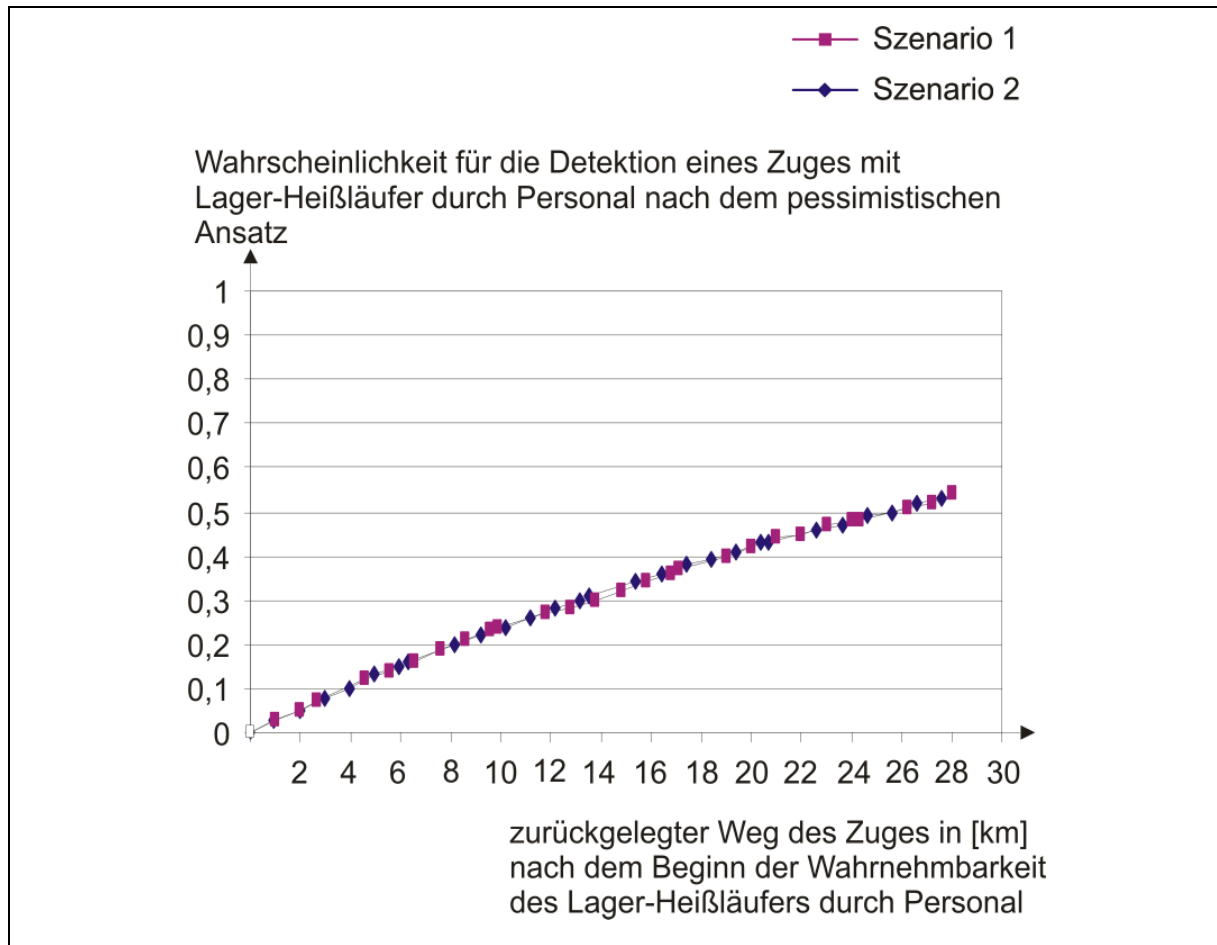


Abbildung 58: Wahrscheinlichkeit für die Detektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer nach Beginn der Wahrnehmbarkeit des Lager-Heißläufers durch Personal bei Kilometer 0 in Abhängigkeit von der vom Zug gefahrenen Wegstrecke für die Szenarien 1 und 2 nach dem pessimistischen Ansatz

Die Wahrscheinlichkeit für die Detektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer nach dem pessimistischen Ansatz erreicht den Wert 0,5 über beide Szenarien bei $s155_{P=0,5}^{Sz1-2,pess} = 25,6 \text{ km}$. Die Berechnung des Wertes für $s155_{P=0,5}^{Sz1-2,pess}$ erfolgt analog des in Abbildung 55 dargestellten Vorgehens. Der Wert liegt somit ca. um den Faktor 3 über dem des realistischen Ansatzes mit 8,644 km gemäß Formel 66.

5.3.4 Ableitung des Abstandes von HOA auf Grundlage der Lager-Heißläuferdetektion durch Personal im Jahr 1983 nach dem pessimistischen Ansatz

Die folgende Ableitung des Abstandes von HOA auf Grundlage der Lager-Heißläuferdetektion durch Personal im Jahr 1983 nach dem pessimistischen Ansatz erfolgt analog zum Vorgehen beim realistischen Ansatz in Kapitel 5.2 bezogen auf den Lager-Heißläufer. Daraus verwendet wird der Weg 50,732 km (Szenario „Bemessung“) in Abbildung 57, nach dem der Mensch einen Lager-Heißläufer nach seiner Entstehung detektieren kann.

Die Entfernung, nach der ein Zug nach der Entstehung eines Lager-Heißläufers durch das Personal einseitig detektiert wurde, ergibt den Wert 76,332 km durch die Summation:

- des Weges, nach dem der Mensch einen Lager-Heißläufer nach seiner Entstehung detektieren kann (50,732 km) und
- des mittleren Abstands von 25,6 km (siehe Kapitel 5.3.3) zwischen dem Beginn der Zugfahrt mit einem für den Menschen detektierbaren Lager-Heißläufer und dem Punkt, an dem die Kurve den Wahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht, über alle Szenarien nach dem pessimistischen Ansatz.

Legt man für die Bemessung des Kilometerintervalls zur Ausrüstung der Strecken mit HOA den pessimistischen Ansatz zugrunde, muss dieses so gewählt sein, dass eine Detektion 76,332 km nach der Entstehung des Lager-Heißläufers erfolgt. Abzüglich des Weges $9,276 \text{ km}^{+6,560 \text{ km}}_{-8,917 \text{ km}}$ (Tabelle 9), den der Zug mit Lager-Heißläufer seit dessen Entstehung bis zur Detektierbarkeit durch eine HOA zurückgelegt hat, folgt ein rechnerischer erforderlicher Abstand zwischen zwei HOA von $67,056 \text{ km}^{-6,560 \text{ km}}_{+8,917 \text{ km}}$. Es ergibt sich ein Intervall zwischen 60,496 km und 75,973 km.

5.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse des Kapitels 5

Durch den vielfachen Wegfall der örtlichen Betriebsbeamten durch Rationalisierungsmaßnahmen entfielen auch die durch diese Personen durchgeführten Zugbeobachtungen zur Detektion von Heißläufern. Als Kompensation wurden HOA installiert, für die in Kapitel 5 untersucht wurde, in welchem Abstand HOA auf Eisenbahnstrecken der DB Netz AG errichtet werden müssen. Es wurden folgende Bearbeitungsschritte gewählt:

1. Festlegung eines Zeitpunktes vor der Einführung der HOA, zu dem die Häufigkeit der Lager-Heißläuferdetektion durch Betriebsbeamte bestimmt wird, die aufgrund des nachfolgenden Wegfalls der Personale mithilfe von HOA zu kompensieren ist,

2. Bestimmung der Häufigkeit der Lager-Heißläuferdetektion durch Betriebsbeamte zum festgelegten Zeitpunkt,
3. Ableitung des Abstandes von HOA auf Eisenbahnstrecken der DB Netz AG aus 2. auf Grundlage der Temperaturentwicklung von Lager-Heißläufern zur Kompensation des Wegfalls der diesbezüglichen Detektion durch Betriebsbeamte.

Als Zeitpunkt zu 1. wurde das Jahr 1983 festgelegt, da ab diesem Jahr erstmals technisch ausgereifte HOA zur Verfügung standen. Da die planmäßige Höchstgeschwindigkeit der Züge im Jahr 1983 bei maximal 200 km/h lag, gelten die Ausführungen in Kapitel 5 ebenfalls nur für Strecken bis zu dieser Höchstgeschwindigkeit. Es ist somit anzunehmen, dass bis 1983 die Detektion von Lager-Heißläufern im Wesentlichen durch Betriebsbeamte erfolgte. Für die Berechnungen zu 2. und 3. wurden zwei Ansätze gewählt. Es handelt sich hierbei um den realistischen Ansatz, der ein regelkonformes Verhalten der Betriebsbeamten zugrunde legt und den pessimistischen Ansatz, der eine untere Grenze der anzunehmenden Häufigkeit der Lager-Heißläuferdetektion durch Betriebsbeamte darstellt. Für den realistischen Ansatz konnte rechnerisch ermittelt werden, dass ein für einen Betriebsbeamten wahrnehmbarer, d. h. durch Rotglut sichtbarer Lager-Heißläufer rechnerisch nach 8,644 km mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 und somit bei einer einseitigen Zugbeobachtung, durch diesen detektiert wurde. Für den pessimistischen Ansatz ergibt sich hierfür der rechnerische Wert 25,6 km.

Bei der Beurteilung der rechnerischen Werte ist deren Genauigkeit zu diskutieren. Aufgrund der Vielzahl der Annahmen, welche in die Berechnungen eingeflossen sind, erscheint eine Betrachtung der Nachkommastellen nicht sinnvoll. Die beiden Werte sollen daher zur sicheren Seite ganzzahlig abgerundet werden. Als Ergebnis zu 2. ist daher festzuhalten, dass ein für einen Betriebsbeamten erkennbarer Lager-Heißläufer durch diesen bei der Annahme des realistischen Ansatzes nach 8 km und bei Zugrundelegung des pessimistischen Ansatzes nach 25 km einseitig detektiert wurde.

Außentemperatur	HOA-Abstände nach dem realistischen Ansatz in [km] aus Kapitel 5.2	HOA-Abstände nach dem pessimistischen Ansatz in [km] aus Kapitel 5.3.4
+30 °C	43	60
0 °C	50	67
-30 °C	59	75

Tabelle 12: Errechnete Werte für den notwendigen Abstand zwischen zwei HOA zur Kompensation der seit 1983 entfallenen Zugbeobachtungen durch den Rückzug der örtlichen Personale nach dem realistischen Ansatz und dem pessimistischen Ansatz

Die ermittelten Werte zu 3. sind in der Tabelle 12 enthalten und sind ebenfalls ganzzahlig abgerundet worden bezüglich der rechnerischen Werte. Betrachtet man die in Tabelle 12 enthaltenen maximalen und minimalen Kilometerangaben, fällt auf, dass diese nah an den bis zum 04.04.2013 gültigen Richtlinie [RIL 819.1601] vorgegebenen, ebenfalls ganzzahligen HOA-Abständen zwischen 40 bis 70 km auf Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h lagen.

Aus dem pessimistischen Ansatz einen regulären Abstand zwischen zwei HOA abzuleiten, ist nicht begründbar. Hierfür ist der realistische Ansatz zugrunde zu legen.

Korrekturbedarf gibt es in [Ril 859] nach den Ergebnissen dieser Arbeit daher insofern, als dass der Abstand zweier aufeinander folgender HOA zwischen maximal 43 km und 59 km betragen sollte. Für die Planung von HOA würde eine Entscheidungsbandbreite von 16 km für deren Positionierung zur Verfügung stehen. Eine weitere Verkleinerung der Entscheidungsbandbreite bzw. die Vorgabe eines singulären maximalen Kilometerwertes für den Abstand zwischen zwei HOA kann aus den Ergebnissen dieser Arbeit wegen des Einflusses der Außentemperatur auf die Berechnungsergebnisse der Szenariengleichungen nach [SCHÖ 2005] gemäß Tabelle 9 nicht zwangsweise abgeleitet werden. Angestrebt werden sollte jedoch ein Abstand von 50 km, da dieser Wert gemäß Tabelle 12 für eine Außentemperatur von 0 °C und somit für die Mitte der betrachteten Temperaturspanne von +30 °C und -30 °C errechnet wurde.

Eine Gegenüberstellung der Abstände der Zugbeobachter im Jahr 1983 und der zu deren Kompensation zu installierenden HOA ist in Abbildung 59 enthalten.

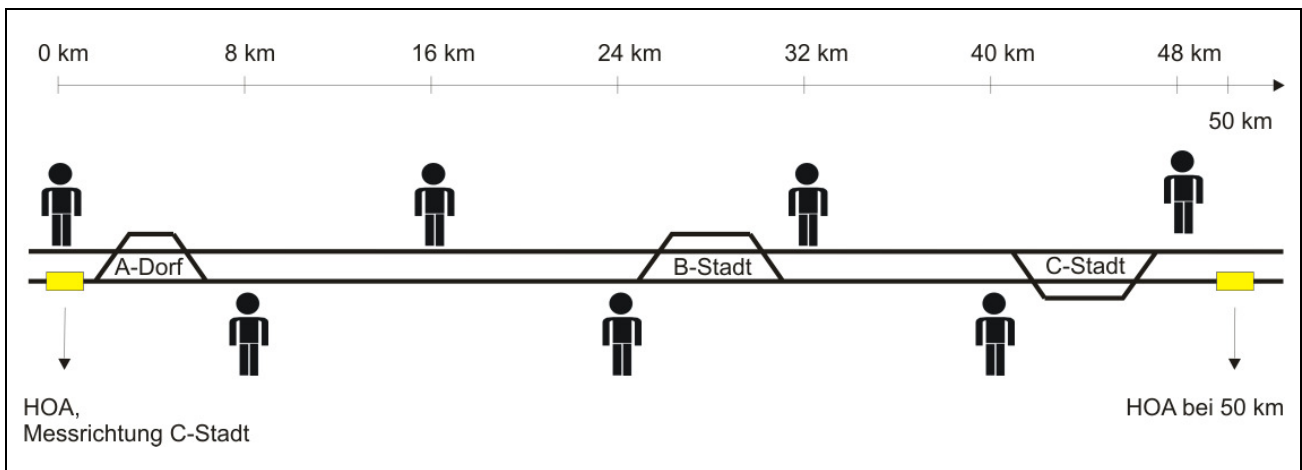


Abbildung 59: Gegenüberstellung der Abstände der Zugbeobachter im Jahr 1983 und der zu deren Kompensation zu installierenden HOA im anzustrebenden Abstand von 50 km

Die Formulierung in der seit 05.04.2013 gültigen Richtlinie [RIL 859], in der nur noch die maximale Entfernung zwischen zwei HOA von maximal 70 km genannt ist, kann daher mit den Ergebnissen dieser Arbeit nicht bestätigt werden.

Mithilfe der Ergebnisse in Kapitel 5 können darüber hinaus Aussagen über die Begründbarkeit der in Kapitel 2.5 dargestellten heutigen Ersatzmaßnahmen bei einem HOA-Ausfall für die in Kapi-

tel 5 betrachteten Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h getroffen werden. Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit über 200 km/h wurden in diesem Kapitel nicht betrachtet, da es im Jahr 1983 keine derartigen planmäßigen Verkehre gab.

Weshalb derzeit vorgeschriebene Ersatzmaßnahmen für den Ausfall einer HOA erst nach mehr als 72 Stunden bzw. bei Ausfall zweier benachbarter HOA nach mehr als 4 Stunden ergriffen werden (siehe Abbildung 5), wird in zugänglichen Quellen nicht erläutert. Der § 2 Abs. 2 aus [EBO 2012] enthält diesbezüglich keinen zeitlichen Vorbehalt, sondern gilt ohne Verzug.

Ebenfalls nicht nachvollziehbar ist, weshalb bei nicht möglicher Einrichtung der Zugbeobachtung keine Kompensationsmaßnahmen für Güterzüge mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 100 km/h vorzusehen sind. Gleiches gilt für Reisezüge auf Strecken bis zu einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h. Bei allen vier aktuell bei der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes eingestellten Untersuchungsberichten zu Entgleisungen von Lager-Heißläufern [EUB BACH], [EUB ENDO], [EUB HERL] und [EUB ROTH] gibt es keine Erkenntnisse, dass die betroffenen Güterzüge mit einer maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit von mehr als 100 km/h gefahren wären.

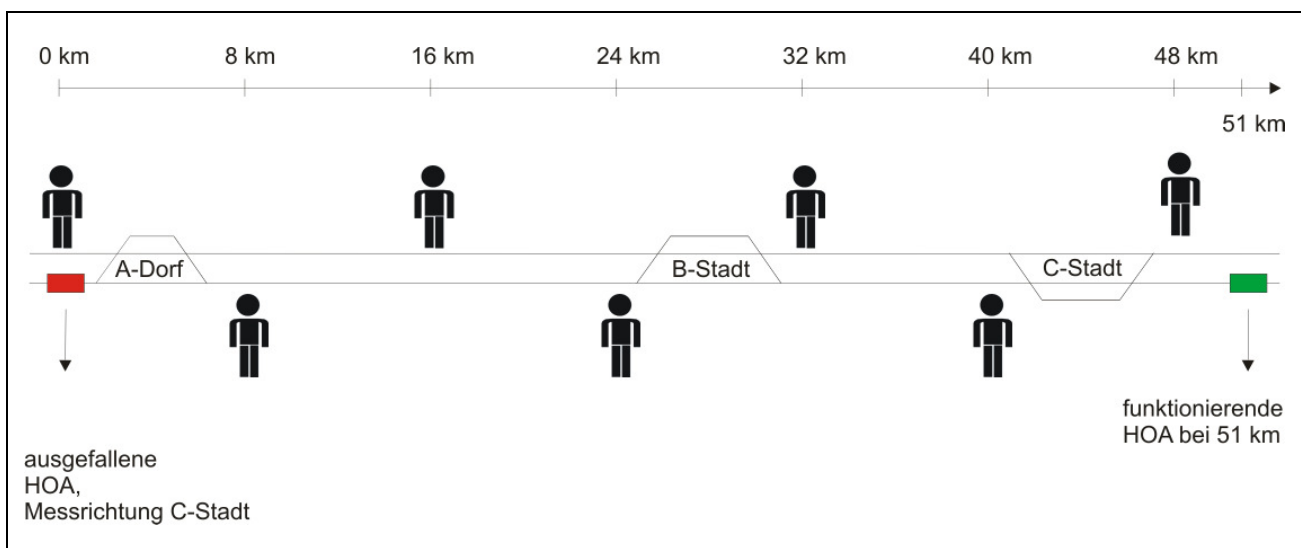


Abbildung 60: Beispiel für die Verteilung der Zugbeobachter (schwarz dargestellte Personen) bei ausgefallener HOA am km 0 in Fahrtrichtung C-Stadt, bei der eine einseitige Detektion eines Lager-Heißläufers nach spätestens 8 km sichergestellt ist

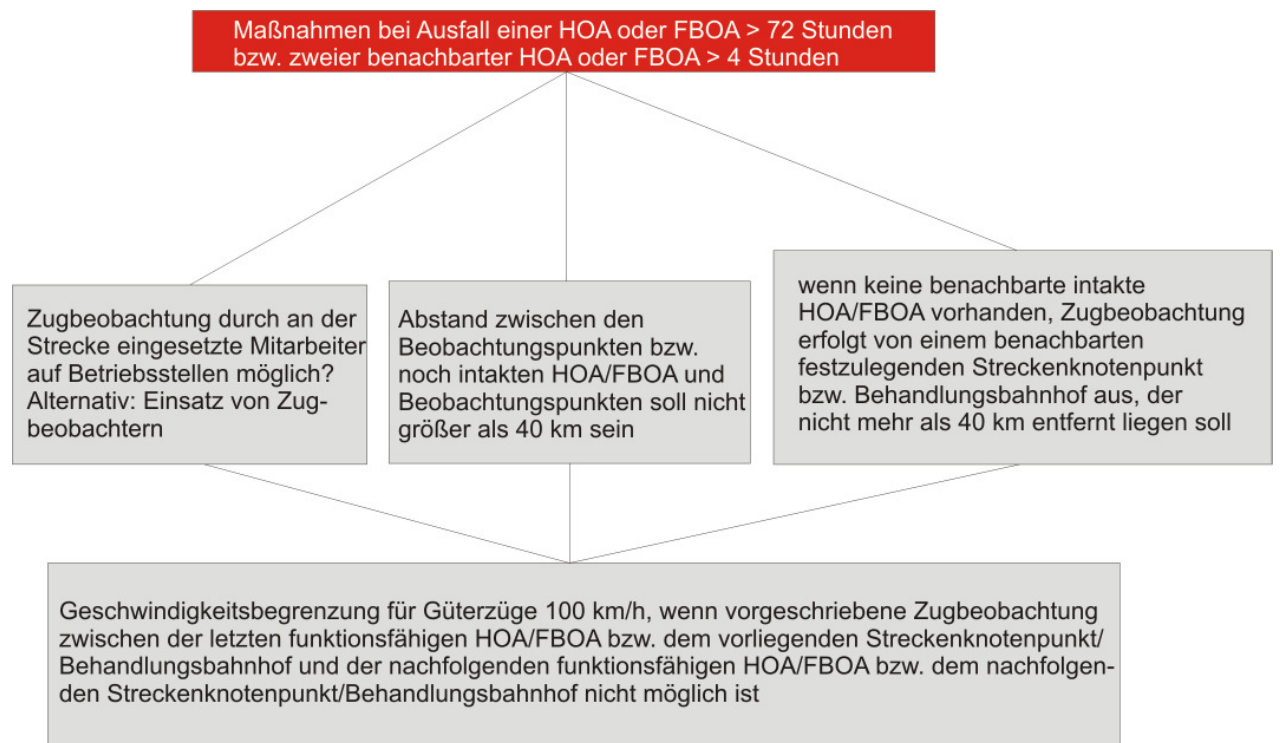
Darüber hinaus kann der derzeit vorgesehene Abstand zwischen noch intakten HOA und einseitigen Beobachtungspunkten von bis zu 40 km nicht bestätigt werden. Selbst wenn man den pessimistischen Ansatz in Kapitel 5.3.3 zugrunde legt, ist ab der ausgefallenen HOA in Fahrtrichtung der funktionstüchtigen HOA im Abstand von 25 km eine wechselseitige Zugbeobachtung erforderlich. Da für den betrieblichen Regelfall jedoch der realistische Ansatz als maßgebend anzunehmen ist, ergibt sich beim Ausfall von HOA hinsichtlich der Kompensation durch Zugbeobachtungen die Notwendigkeit, diese wechselseitig alle 8 km pro Fahrtrichtung ab der ausgefallenen

HOA vorzusehen (Abbildung 60), um spätestens nach dem genannten Kilometerwert eine einseitige Detektion sicherzustellen.

Bei einem anzustrebenden Intervall von 50 km zwischen zwei HOA sind zur Kompensation einer ausgefallenen HOA sieben wechselseitig tätige Zugbeobachter notwendig, beginnend ab dem Standort der ausgefallenen HOA, deren Einsatz sofort nach dem Ausfall einer HOA zu veranlassen ist. Da die Sicherstellung einer derart dichten Zugbeobachtung schwer realisierbar sein dürfte, sollten andere Kompensationsmöglichkeiten erarbeitet werden. Beispielsweise könnte das Systemdesign der HOA so verändert werden, dass entscheidende Bauteile redundant ausgeführt werden und mit zusätzlicher Ausfalloffenbarung eines defekten Bauteils. Beim Ausfall eines Bauteils würde das redundante Bauteil die Funktion übernehmen bis das ausgefallene Bauteil instand gesetzt wurde. Die Verfügbarkeit der Bauteile und der einzuräumende Zeitraum bis zur Instandsetzung eines defekten Bauteils wären so festzulegen, dass ein Ausfall der HOA hinreichend unwahrscheinlich ist. Ebenfalls zu untersuchen wäre, welche Verfügbarkeit in diesem Zusammenhang als hinreichend angesehen werden kann. Die Entwicklung dieses Systemdesigns ist aus Gründen des Umfangs nicht Bestandteil dieser Arbeit und bleibt nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten vorbehalten.

Ein bisher nicht diskutierter Sonderfall ergibt sich, wenn nach einer ausgefallenen HOA in Fahrtrichtung keine weitere HOA folgt, bevor die Strecke einen Endpunkt erreicht. Dies kann z. B. bei einer ausgefallenen HOA auftreten, bei der in Fahrtrichtung ein Grenzübergang oder ein Überseehafen folgt. In diesem Fall ist die Zugbeobachtung bis zur Grenze bzw. zum sonstigen Endpunkt der Strecke vorzusehen.

bisher:



nach den Ergebnissen dieser Arbeit:

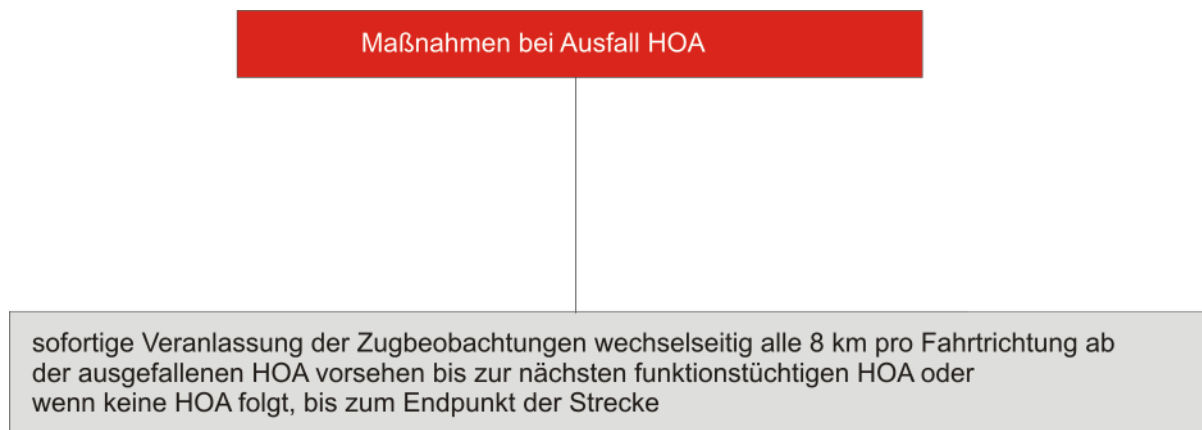


Abbildung 61: Gegenüberstellung der heutigen Maßnahmen bei Ausfall von HOA aus Abbildung 5 für Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h, zusammengestellt aus [END 2007], [KLIM 2008], oben; unten mit den aus den Ergebnissen dieser Arbeit abzuleitenden Maßnahmen

Da sich die Untersuchungen dieser Arbeit aus Gründen des Umfangs auf das Netz der DB Netz AG beschränken, werden Züge nach dem Grenzübertritt ins benachbarte Ausland nicht betrachtet.

Die Inhalte der Abbildung 5 wären nach den Ergebnissen dieser Arbeit zu ändern, wie in Abbildung 61 dargelegt, wenn bei Ausfall von HOA weiterhin die Zugbeobachtung als Ersatzmaßnahme beibehalten werden soll.

Nicht Bestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung, welchen Sicherheitsgewinn Geschwindigkeitsbeschränkungen als Kompensation beim Ausfall von HOA ermöglichen. Dies erscheint aus Sicht des Autors vorrangig von fahrzeugseitigen Einflüssen abhängig.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Zur Sinnhaftigkeit und Korrektheit heutiger technischer und betrieblicher Regelungen im Eisenbahnbereich gibt es häufig keine wissenschaftlichen Untersuchungen. So sind keine Belege bekannt, die die Notwendigkeit des Stellens HOA-detektierter Züge mithilfe teurer Sicherungstechnik am Hauptsignal stützen würden. Ebenfalls liegen keine quantitativen Belege für den derzeit vorgeschriebenen Abstand zwischen zwei HOA von maximal 70 km bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit bis 200 km/h und bei über 200 km/h von maximal 35 km vor. Gleiches gilt für die derzeit vorgeschriebenen Ersatzmaßnahmen, die beim Ausfall einer oder mehrerer HOA zu ergreifen sind.

Die Notwendigkeit der sicherheitlichen Befassung mit HOA resultiert aus den möglichen Folgen der Schäden an Festen Bremsen und Radsatzlagern, die mit hohen Temperaturen und der Zerstörung von Bauteilen mit spurführender Funktion einhergehen. Hieraus können Brände und Entgleisungen folgen. Das aus einer Entgleisung resultierende Verlassen des sicherungstechnisch gesicherten Regellichtraums ist die Konsequenz. Aufgrund der genannten Gefährdungen und dem einhergehenden Verstoß gegen [EBO 2012] ist eine sicherheitliche Befassung mit der Thematik sinnvoll.

In Kapitel 2 wurden funktionale, technische und betriebliche Belange von HOA auf Strecken der DB Netz AG dargestellt. Wird am Radsatzlager eine Temperatur ≥ 100 K über der Außentemperatur bis 30 °C bzw. ≥ 65 K zwischen beiden Radsatzlagern einer Achse oder ≥ 400 °C am Radreifen gemessen, ist der Zug in der Regel an einem Hauptsignal zu stellen, welches sich je nach Geschwindigkeit des Zuges in einer Entfernung von ca. 4 km, ca. 8 km oder ca. 12 km nach der HOA befinden muss. Sind derart viele Stellsignale in der genannten dichten Folge nicht vorhanden, muss die hierfür erforderliche Sicherungstechnik gebaut und nachfolgend instand gehalten werden. Dies gilt auch dann, wenn die diesbezüglich zu errichtenden Hauptsignale weder für die Zugreihenfolge- noch für die Zugfolgeregulierung benötigt werden. Daher wird in den beiden anschließenden Kapiteln untersucht, ob eine Stellung HOA-detektierter Züge ohne die Mitwirkung der Sicherungstechnik aber dennoch mit gleicher Sicherheit erfolgen kann.

Hierzu sind in Kapitel 3 für die Abläufe des Stellens von HOA-detektierten Zügen einschließlich des Aussetzens des betroffenen Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik vier Ereignisketten quantifiziert worden. Es wurden die Ereignisse der Ereignisketten identifiziert, quantifiziert und die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereignisketten berechnet. Es handelt

sich hierbei um zwei Ereignisketten für PZB-überwachte Züge auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen sowie auf sonstigen Strecken. Zwei weitere Ereignisketten umfassen LZB-geführte Züge nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik für dieselbe Streckenaufteilung.

Ereignisketten	für Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen	für sonstige Strecken
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs <u>nach heutigen anerkannten Regeln der Technik (Kapitel 3.2)</u>	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs <u>nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik (Kapitel 3.3)</u>	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs <u>(Kapitel 4.1)</u>	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$
Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer <u>(Kapitel 4.2)</u>	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$

Tabelle 13: Gegenüberstellung der in dieser Arbeit errechneten Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten

In Kapitel 4 konnten neue Abläufe ohne die Mitwirkung der Sicherungstechnik analysiert werden. Dazu wurden in Kapitel 4.1 zwei Ereignisketten für die genannte Streckenaufteilung untersucht, bei denen die Stellung am Stellsignal durch das Stellen an der 3H-Tafel substituiert wurde. Es konnte jedoch keine gleiche Sicherheit erreicht werden im Vergleich zu den Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik (siehe Tabelle 13).

Zum Sicherstellen der gleichen Sicherheit mussten weitere Maßnahmen ergriffen werden. Hierzu wurde zusätzlich in Kapitel 4.2 eine direkte technische Übertragung der HOA-Alarmmeldung zum Triebfahrzeugführer vorgesehen. Der Triebfahrzeugführer und der Fahrdienstleiter können danach die unabhängig voneinander erhaltene HOA-Alarmmeldung abgleichen und ggf. korrigieren. Diese beiden Ereignisketten für die genannte Streckenaufteilung erreichen nach den Ergebnissen die-

ser Arbeit die gleiche Sicherheit wie die Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik (siehe Tabelle 13). Allerdings liegt der Wert der diesbezüglichen Gesamtversagenswahrscheinlichkeit für sonstige Strecken mit $1,43 \cdot 10^{-2}$ nur geringfügig unter denen der heutigen Ereignisketten mit $1,52 \cdot 10^{-2}$. Daher sollte vor einer Implementierung des in Kapitel 4.2 genannten Systemdesigns auf sonstigen Strecken geprüft werden, ob der Nachweis gleicher Sicherheit auch mit den dann vorliegenden aktuellen Daten und Erkenntnissen weiterhin erfüllt ist.

Durch die nun mögliche Nutzung von 3H-Tafeln zur Stellung HOA-detektierter Züge sind für das Stellen keine sicherungstechnischen Anlagen mehr erforderlich. Dies hat zur Folge, dass auf die heute hierfür notwendige Errichtung sicherungstechnischer Anlagen verzichtet werden kann, wenn nicht ausreichend Stellsignale, einschließlich der erforderlichen Vorsignale, an der Strecke vorhanden sind. Auch können für den Planer von HOA deutliche Erleichterungen realisiert werden, da nun eine Vielzahl weiterer Stellorte zur Verfügung steht.

Weiterhin konnte in Kapitel 5 untersucht werden, in welchem Abstand HOA an der Strecke zu errichten sind. Grundlage hierfür war die Abschätzung, in welchem Abstand im Jahr 1983 im Netz der Deutschen Bundesbahn Lager-Heißläufer durch einen Betriebsbeamten detektiert wurden. Hierzu erfolgte eine umfassende Literaturrecherche. Darauf aufbauende Berechnungen ergaben, dass dies einseitig ca. alle 8 km nach dem realistischen Ansatz und alle 25 km nach dem pessimistischen Ansatz der Fall war. Da HOA einen Lager-Heißläufer bereits bei geringeren Temperaturen detektieren können als Menschen, ist es möglich, HOA in größeren Abständen zu errichten, als dies hinsichtlich der Detektion durch Betriebsbeamte erfolgte. Nach den Ergebnissen dieser Arbeit ergibt sich für Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h ein erforderlicher Abstand zwischen zwei HOA im Bereich von maximal 43 bis 59 km, angestrebt werden sollte ein Abstand von 50 km. Die diesbezüglichen Vorgaben in [RIL 859], die einen Abstand von bis zu 70 km zulassen, wären nach den Ergebnissen dieser Arbeit dementsprechend zu reduzieren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern somit die ideale Möglichkeit, die Sicherheit aufgrund der Reduktion der HOA-Abstände zu erhöhen und gleichzeitig Kosten durch die nicht mehr erforderliche Nachrüstung von Sicherungstechnik zum Stellen von HOA-detektierten Zügen zu senken.

Nicht bestätigt werden kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit die Sinnhaftigkeit der derzeit vorgesehenen Ersatzmaßnahmen beim Ausfall von HOA. Ersatzmaßnahmen auf Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h sind sofort zu veranlassen. Derzeit zulässige Zeiträume ohne Ersatzmaßnahmen von bis zu 72 Stunden bei Ausfall einer HOA bzw. von bis zu 4 h bei Ausfall zweier benachbarter HOA können nicht begründet werden.

Soll als Ersatzmaßnahme die Zugbeobachtung vorgesehen werden, muss diese nach den Ergebnissen dieser Arbeit im Wechsel einseitig im Abstand von maximal 8 km erfolgen. Der derzeit zulässige Abstand von 40 km ist danach ebenfalls nicht begründbar.

Diese Arbeit zeigt somit Beispiele für mögliche Methodiken zur Bewertung von heutigen anerkannten Regeln der Technik und diesbezügliche Wege, wie deren heutige, vielfach rein empirisch entstandene Inhalte auf eine wissenschaftlich begründbare Basis gestellt werden können.

6.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgenommenen Annahmen und Abschätzungen könnten in nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten überprüft und durch ggf. dann neu vorliegende Erkenntnisse präzisiert werden. Dies gilt z. B. für die Untersuchung der Abstände von HOA, die in dieser Arbeit nur auf Erkenntnissen zu Lagerschäden, nicht jedoch auf Schäden durch Feste Bremsen beruhen.

Auch interdisziplinäre Untersuchungen könnten ungeklärte sicherheitlich bedeutsame Fragen beantworten. Beispielsweise ist bisher nicht abschließend geklärt, bis zu welcher Geschwindigkeit ein Mensch durch die Zugbeobachtung Heißläufer wahrnehmen kann und in welchem Abstand zur Gleismitte sich der Zugbeobachter befinden sollte. Da das Sehvermögen von einer Vielzahl von medizinischen und wahrnehmungspsychologischen Faktoren abhängt, wäre eine Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern beider Fachgebiete zielführend. Gleiches gilt für die Ausgestaltung der arbeitsmedizinischen Untersuchung, der sich die Triebfahrzeugführer zu unterziehen haben. Zu klären ist, inwieweit und in welchem Umfang dabei geprüft wird, ob der einzelne Triebfahrzeugführer im Bereich der Hände ein ausreichendes Temperaturempfinden hat, um ein HOA-detektiertes Bauteil zu erkennen. In [RIL 107] sind keine Hinweise enthalten, dass für Triebfahrzeugführer eine solche Untersuchung überhaupt vorgesehen ist.

Da die notwendige Folge von Zugbeobachtern von ca. 8 km beim HOA-Ausfall nur schwer realisierbar sein dürfte, sollte in nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten ein neues Systemdesign erarbeitet werden, das Ausfälle von HOA z. B. durch Redundanzen und Ausfalloffenbarungen einzelner Bauteile mit hinreichender Wahrscheinlichkeit nicht auftreten lässt.

Diese Arbeit geht davon aus, dass die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik akzeptiert sind. Weitere wissenschaftliche Forschungen könnten zeigen, wie die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit abgesenkt werden kann. Potenziale könnten in der Erhöhung der Verfügbarkeit von HOA und der MAS 90 liegen und in der Ausstattung des Triebfahrzeugführers mit geeigneten Messinstrumenten zur Temperaturmessung an HOA-detektierten Bauteilen.

Zum grundsätzlichen prozessualen Umgang mit Heißläufern stellt sich die Frage, ob deren Detektion langfristig die Aufgabe des Eisenbahninfrastrukturunternehmens bleiben sollte. Heißläufer sind ein Phänomen der Eisenbahnfahrzeuge. Der sichere Betrieb von Fahrzeugen und darin eingeschlossen die Vermeidung bzw. rechtzeitige Erkennung von Heißläufern vor dem Eintritt einer

Gefahr ist daher Aufgabe des Eisenbahnverkehrsunternehmens. Ein interoperabler Ansatz, der sämtliche Eisenbahnfahrzeuge umfasst, könnte erarbeitet werden und sollte prozessuale und technologische Vorgaben umfassen. Eine Detektion von Heißläufern durch technische Einrichtungen am Fahrzeug hätte den Vorteil, dass die diesbezügliche Überwachung linienförmig und somit kontinuierlich erfolgen könnte. Infrastrukturseitig ist dies nach dem heutigen Stand der Technik nur punktförmig möglich. Welcher Sicherheitsgewinn durch eine linienförmige, fahrzeugseitige Heißläuferüberwachung realisierbar ist und ob die Kosten betriebswirtschaftlich für die Unternehmen bzw. volkswirtschaftlich vertretbar sind, könnte ebenfalls in nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten geklärt werden.

Formelzeichenverzeichnis

- F = Gesamtversagenswahrscheinlichkeit einer Ereigniskette (Kapitel 3.2)
- f = Versagenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses
- L_H = Richtwert für den Abstand zwischen der HOA/FBOA und dem Stellort, an dem der Zug anzuhalten ist in [m] (Formel 1)
- L_V = örtlich vorhandener Vorsignalabstand (Bremsweg der Strecke) in [m] (Formel 1)
- L_{VS} = Sichtpunkt auf das Vorsignal in [m] (Formel 1)
- L_Z = zulässige Zuglänge der Zuggattung, die mit der größten zulässigen Geschwindigkeit auf der Strecke verkehrt bzw. maximale Zuglänge der Zuggattung der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe in [m] (Formel 1)
- t_H = Zeit, die für betriebliche Handlungen des Fahrdienstleiters (z. B. Stellen des Signals) erforderlich ist. Die Zeit kann je nach den betrieblichen Erfordernissen zwischen 30s und 45 s festgelegt werden in [s] (Formel 1)
- v_{max} = maximal zulässige Geschwindigkeit der jeweils betrachteten Geschwindigkeitsstufe in [km/h] (Formel 1)
- $f1_{HOA\text{ bei Zugfahrt}} = 5 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit der HOA bei Überfahrt eines Zuges mit Heißläufer (Formel 2, Formel 6)
- $f2_{MAS90} = 5 \cdot 10^{-2}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Systems MAS 90 bei HOA-Befahrung eines Zuges mit Heißläufer (Formel 3, Formel 4)
- $f3_{MAS90-redundant} = 2,5 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Systems MAS 90 mit redundanten Komponenten bei HOA-Befahrung eines Zuges (Formel 4, Formel 6)
- $f4_{Zugnummernbereitstellung} = 5 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit der Bereitstellung der Zugnummer für das System MAS 90 (Formel 5, Formel 6)
- $f5^{Fdl}_{Zugnummernermittlung} = 1 \cdot 10^{-1}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Zugnummernermittlung bei einer HOA-Alarmmeldung ohne Zugnummer (Kapitel 3.2.1, Formel 6)

-
- $f6_{HOA-MRE} = 8 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen über das System MAS 90 an den Fahrdienstleiter“ (Formel 6)
 - $f7^{Fdl}_{Alarmwahrnehmung} = 1 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Wahrnehmung der HOA-Alarmmeldung (Kapitel 3.2.2, Formel 7)
 - $f8^{Fdl}_{Erfassen\ der\ HOA-Alarmmeldung} = 1 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters beim Erfassen des Inhalts der HOA-Alarmmeldung (Kapitel Kapitel 3.2.2, Formel 7)
 - $f9^{Fdl}_{Hp0\ nach\ HOA-Alarmmeldung} = 1 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters bei der Sicherstellung der Haltstellung des Stellsignals (Kapitel 3.2.2, Formel 7)
 - $f10^{Fdl}_{Hp0} = 3 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Sicherstellen der Haltstellung des Stellsignals nach den Vorgaben der HOA-Alarmmeldung (Formel 7)
 - $f11_{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum} = 7,9 \cdot 10^{-4}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ (Formel 8)
 - $f12_{GSM-R-Technik; sonstige\ Strecke} = 4,69 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken.“ (Formel 9)
 - $f13_{GSM-Technik} = 1 \cdot 10^{-2}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Die GSM-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung zwischen dem Triebfahrzeugführer und dem Fahrdienstleiter.“ (Formel 10)
 - $f14^{Fdl}_{Information\ an\ Tf,\ Achse\ und\ Zugseite\ nach\ HOA-Alarmmeldung} = 5 \cdot 10^{-4}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden.“ (Kapitel 3.2.3)
 - $f15^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Achse} = 5 \cdot 10^{-4}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die detektierte Achse richtig.“ (Kapitel 3.2.3)
 - $f16^{Tf}_{Informationswahrnehmung\ Zugseite} = \frac{5}{3} \cdot 10^{-4}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Zugseite des Heißläufers richtig.“ (Formel 11)

-
- $f17^{Fdl}{}_{GSM-R-Bedienung} = 1 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter stellt durch die Bedienung des GSM-R-Endgerätes die Verbindung zum HOA-detektierten Zug her.“ (Kapitel 3.2.3)
 - $f18^{Fdl,Tf}{}_{Information\ detektierte\ Achse\ und\ Zugseite\ an\ Tf;\ ETCS-Strecke, Ballungsraum} = 2,18 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf Strecken in Ballungsräumen bzw. Strecken mit ETCS.“ (Formel 12)
 - $f19^{Fdl,Tf}{}_{Information\ detektierte\ Achse\ und\ Zugseite\ an\ Tf;\ sonstige\ Strecke} = 2,21 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse und die detektierte Zugseite auf sonstigen Strecken.“ (Formel 13)
 - $f20^{Tf}{}_{PZB\ 90-Technik\ bei\ Hp0} = 9,24 \cdot 10^{-12}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält bei nicht funktionstüchtiger PZB 90 am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 14)
 - $f21_{PZB\ 90} = 1,2 \cdot 10^{-6}$; Versagenswahrscheinlichkeit der PZB 90, d. h. des PZB-Fahrzeuggerätes oder der PZB-Streckeneinrichtung (Formel 14)
 - $f22^{Tf}{}_{Hp0} = 7,7 \cdot 10^{-6}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 14, Formel 15)
 - $f23^{Tf}{}_{Kommunikation\ mit\ Fdl\ nach\ Zwangsbremung} = 1 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers hinsichtlich seiner Pflicht, nach einer Zwangsbremung mit dem Fahrdienstleiter bezüglich der Modalitäten für die Weiterfahrt zu kommunizieren nach [RIL 408.0652] (Formel 15)
 - $f24^{Tf}{}_{Missdeutung\ PZB} = 1 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers, die PZB-Leuchtmeldeanzeige und den Warnton als Hinweis auf eine Zwangsbremung nach einer Hp 0-Überföhrung zu deuten (Formel 15)
 - $f25^{Tf}{}_{unzulässige\ Befreiung\ für\ Weiterfahrt} = 1 \cdot 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers für dessen Versagen, bei dem er sich unzulässigerweise aus der 2000 Hz-Beeinflussung nach der Zwangsbremung zur Fortsetzung der Fahrt befreit (Formel 15)

-
- f_{26}^{Tf} Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90 funktionierend $= 7,7 * 10^{-15}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält bei funktionierender PZB 90 am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 15)
 - f_{27}^{Tf} Weiterfahrt bei Hp0; PZB 90 $= 9,25 * 10^{-12}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer eines PZB 90-überwachten Zuges hält am Halt zeigenden Stellsignal an.“ (Formel 16)
 - f_{28}^{Tf} Identifikation Achse $= 1 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse.“ (Kapitel 3.2.5)
 - f_{29}^{Tf} Aussetzen $= 1 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer setzt das schadhafte Fahrzeug aus.“ (Kapitel 3.2.6)
 - F_{30} Stellung; ARdT, PZB90, ETCS – Strecke, Ballungsraum $= 1,52 * 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik (Formel 17)
 - F_{31} Stellung; ARdT, PZB90, sonstige Strecken $= 1,52 * 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach heutigen anerkannten Regeln der Technik (Formel 18)
 - F_{32} Stellung; ARdT, LZB – Führung, ETCS – Strecke, Ballungsraum $= 1,52 * 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik (Formel 19)
 - f_{33}^{Tf} Weiterfahrt bei Hp0; LZB $= 0$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält unter Führung der LZB am Stellsignal an.“ (Kapitel 3.3)
 - F_{34} Stellung; ARdT, LZB – Führung, sonstige Strecken $= 1,52 * 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik (Formel 20)
 - $f_{35}^{Fdl, Tf}$ Information detektierte Achse, Zugseite und 3H – Tafel an Tf; ETCS – Strecke, Ballungsraum $= 6,46 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Trieb-

fahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ (Formel 21)

- $f36^{Fdl,Tf}$ *Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf; sonstige Strecke* $= 1,04 * 10^{-2}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter kommuniziert dem Triebfahrzeugführer erfolgreich die detektierte Achse, die detektierte Zugseite und die Kilometrierung der 3H-Tafel auf sonstigen Strecken.“ (Formel 22)
- $f37^{Fdl}$ *Information detektierte Achse, Zugseite und 3H-Tafel an Tf* $= 1 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Ereignisses: „Der Fahrdienstleiter teilt dem Triebfahrzeugführer mit, welche Achse und welche Zugseite durch die HOA detektiert wurden und die Kilometrierung der 3H-Tafel.“ (Kapitel 4.1.2)
- $f38^{Tf}$ *Informationswahrnehmung 3H-Tafel* $= 1 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer erfasst die Kilometrierung der 3H-Tafel richtig.“ (Kapitel 4.1.2)
- $f39^{Tf}$ *Halt an 3H-Tafel* $= \frac{2}{3} * 10^{-2}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer hält an der 3H-Tafel an.“ (Formel 23)
- $F40$ *Stellung an 3H-Tafel; ETCS-Strecke, Ballungsraum* $= 2,31 * 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (Formel 24)
- $F41$ *Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke* $= 2,71 * 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken (Formel 25)
- $f42^{HOA-MAS90-redundant}$ $= 7,5 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „HOA detektiert Heißläufer und meldet diesen an das System MAS 90“ (Formel 26)
- $f43_{KE}$ $= 2,5 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit der Kommunikationseinheit (Kapitel 4.2.2)
- $f44^{Fdl}$ *Abgleich HOA-Alarmmeldung* $= 1 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Fahrdienstleiters für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ (Kapitel 4.2.5)

-
- $f 45^{Tf}$ *Abgleich HOA-Alarmmeldung* = $1 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit des Triebfahrzeugführers für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter und der Triebfahrzeugführer vergleichen die vorab voneinander unabhängig erhaltene HOA-Alarmmeldung.“ (Kapitel 4.2.5)
 - $f 46^{Fdl, Tf}$ *Fehlerkorrektur durch Fdl; ETCS-Strecke, Ballungsraum* = $6,29 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter informiert den Triebfahrzeugführer über die korrekte HOA-Alarmmeldung, wenn der Triebfahrzeugführer diese nicht erhalten oder nicht korrekt wahrgenommen hat auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ (4. und 5b. Abbildung 40), (Formel 27)
 - $f 47^{Fdl, Tf}$ *Fehlerkorrektur durch Fdl; sonstige Strecke* = $1,02 * 10^{-2}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Fahrdienstleiter informiert den Triebfahrzeugführer über die korrekte HOA-Alarmmeldung, wenn der Triebfahrzeugführer diese nicht erhalten oder nicht korrekt wahrgenommen hat auf sonstigen Strecken.“ (4. und 5b. Abbildung 40), (Formel 28)
 - $f 48^{Tf}$ *redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum* = $1,66 * 10^{-2}$; Versagenswahrscheinlichkeit des redundanten Teils der Ereigniskette mit direkter HOA-Alarmmeldungsübertragung zum Triebfahrzeugführer (2., 3. und 5a. in Abbildung 40) auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (Formel 29)
 - $f 49^{Tf}$ *redundanter Teil; sonstige Strecke* = $2,05 * 10^{-2}$; Versagenswahrscheinlichkeit des redundanten Teils der Ereigniskette mit direkter HOA-Alarmmeldungsübertragung zum Triebfahrzeugführer (2., 3. und 5a. in Abbildung 40) auf sonstigen Strecken (Formel 30)
 - $f 50^{Tf, Fdl}$ *redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum* = $1,37 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für den redundanten Teil der Ereigniskette (2. bis 5b. in Abbildung 40) auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (Formel 31 und Formel 40)
 - $f 51^{Tf, Fdl}$ *redundanter Teil; sonstige Strecke* = $5,27 * 10^{-3}$; Versagenswahrscheinlichkeit für den redundanten Teil der Ereigniskette (2. bis 5b. in Abbildung 40) auf sonstigen Strecken (Kapitel 4.2.5)
 - $f 52^{Tf}$ *Identifikation Achse mit KE* = $5 * 10^{-4}$; Versagenswahrscheinlichkeit für das Ereignis: „Der Triebfahrzeugführer identifiziert die detektierte Heißläuferachse mit mehrfacher Abhörmöglichkeit der HOA-Alarmmeldung durch die Kommunikationseinheit.“ (Kapitel 4.2.6)
 - $F 53$ *Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum* = $1,04 * 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-

Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen (1. bis 7. in Abbildung 40), (Formel 41)

- $F54_{\text{Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke}} = 1,43 \cdot 10^{-2}$; Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf sonstigen Strecken (1. bis 7. in Abbildung 40), (Formel 42)
- $s100_{Bf} = 1,908 \text{ km}$; durchschnittliche Betriebslänge eines Bahnhofs (Formel 43)
- $s101_{Bf, \text{gesamt}} = 7408 \text{ km}$; Betriebslänge aller Bahnhöfe (Formel 43)
- $n102_{Bf} = 3882$; Anzahl der Bahnhöfe (Formel 43)
- $n103_{\text{Stw, Bf, besetzt}} = 4199$; Anzahl der mit Personal besetzten Stellwerke in Bahnhöfen (Formel 44)
- $n104_{\text{Befehlsstellen}} = 58$; Anzahl der mit Personal besetzten Befehlsstellen in Bahnhöfen (Formel 44)
- $n105_{\text{Befehlsstellwerke}} = 1005$; Anzahl der mit Personal besetzten Befehlsstellwerke in Bahnhöfen (Formel 44)
- $n106_{\text{Zentralstellwerke}} = 2217$; Anzahl der mit Personal besetzten Zentralstellwerke in Bahnhöfen (Formel 44)
- $n107_{\text{Wärterstellwerke}} = 1137$; Anzahl der mit Personal besetzten Wärterstellwerke in Bahnhöfen (Formel 44)
- $n108_{\text{Stw, ferngesteuert}} = 218$; Anzahl der ferngesteuerten und somit nicht mit Personal besetzten Stellwerke (Formel 44)
- $n109_{\text{besetzte Stw pro Bf}} = 1,08$; durchschnittliche Anzahl von besetzten Stellwerken im Bahnhof (Formel 45)
- $P110_{\text{Personal Heißläuferdetektion, Bf}} = 0.25$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit einem Lager-Heißläufer bei der Durchfahrt im Bahnhof durch das dort tätige Personal detektiert wurde (Formel 46)

-
- $P111_{\text{Personal Zugbeobachtung, Bf}} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug bei der Fahrt durch den Bahnhof von einem Zugbeobachter beobachtet wurde (Formel 46)
 - $P112_{\text{Personal Standort auf Heißläuferseite, Bf}} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass sich das zugbeobachtende Personal im Bahnhof auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 46)
 - $s113_{\text{fS, Abschnitt}} = 5,313 \text{ km}$; durchschnittliche Länge eines Abschnitts der freien Strecke zwischen zwei Bahnhöfen (Formel 47)
 - $s114_{\text{fS, gesamt}} = 20637 \text{ km}$; Betriebslänge der freien Strecke (Kapitel 5.1.1 und Formel 47)
 - $s115_{\text{Stw-Abstand, fS}} = 72,410 \text{ km}$; durchschnittliche Entfernung zwischen zwei Stellwerken bezogen auf die freie Strecke (Formel 48)
 - $n116_{\text{Stw, fS}} = 285$; Anzahl der ständig besetzten Stellwerke auf der freien Strecke (Formel 48)
 - $P117_{\text{Stellwerkspersonal Heißläuferdetektion pro km, fS}} = 0,003$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke durch einen Stellwerksmitarbeiter detektiert wurde (Formel 49)
 - $P118_{\text{Stellwerkspersonal Zugbeobachtung, Stw, fS}} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug bei der Vorbeifahrt an einem Stellwerk der freien Strecke von einem Stellwerksmitarbeiter beobachtet wurde (Formel 49)
 - $P119_{\text{Stellwerkspersonal Standort auf Heißläuferseite, fS}} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass sich der Stellwerksmitarbeiter der freien Strecke auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 49)
 - $s120_{\text{PBÜ-Abstand, fS}} = 9,898 \text{ km}$; durchschnittliche Entfernung zwischen zwei mit Personal besetzten Bahnübergängen bezogen auf die freie Strecke (Formel 50)
 - $n121_{\text{PBÜ, fS}} = 2085$; Anzahl der mit Personal besetzten Bahnübergänge auf der freien Strecke (Formel 50)
 - $P122_{\text{PBÜ-Personal Heißläuferdetektion pro km, fS}} = 0,051$; Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke von Personal am Bahnübergang detektiert wurde (Formel 51)

-
- $P123_{\substack{PBÜ - Personal \\ Zugbeobachtung, PBÜ, fS}} = 1$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einem Bahnübergang der freien Strecke von dessen Personal beobachtet wurde (Formel 51)
 - $P124_{\substack{PBÜ - Personal \\ Standort auf Heißläuferseite, fS}} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass sich das Personal am Bahnübergang der freien Strecke bei der Zugbeobachtung auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 51)
 - $s125_{PVA-fS, Abstand} = 79,069 \text{ km}$; durchschnittliche Entfernung zwischen zwei PVA-fS (Formel 52)
 - $n126_{PVA-fS} = 261$; Anzahl der PVA-fS (Formel 52)
 - $P127_{\substack{Personal der PVA-fS \\ Heißläuferdetektion pro km, fS}} = 0,003$; Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke vom Personal einer PVA-fS detektiert wurde (Formel 53)
 - $P128_{\substack{Personal der PVA-fS \\ Zugbeobachtung, PVA-fS}} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einer PVA-fS von dessen Personal beobachtet wurde (Formel 53)
 - $P129_{\substack{Personal der PVA-fS \\ Standort auf Heißläuferseite, fS}} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass sich das Personal der PVA-fS auf der Seite des Lager-Heißläufers befand (Formel 53)
 - $P130_{\substack{Personal \\ Heißläuferdetektion pro km, fS}} = 0,057$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro gefahrenem Kilometer der freien Strecke durch Personal detektiert wurde (Formel 57)
 - $P131_{\substack{Personal \\ Sz1, Heißläuferdetektion, Schritt 1}} = 0,13$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal detektiert wurde nach Szenario 1 (Formel 58)
 - $\bar{P}132_{\substack{Personal \\ Sz1, Heißläuferdetektion, Schritt 1}} = 0,87$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal nicht detektiert wurde nach Szenario 1 (Formel 59)
 - $\bar{P}133_{\substack{Personal \\ Sz1, Heißläuferdetektion, Schritt 2}} = 0,82$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs (Schritt 1) und 1 km Fahrt auf der freien Strecke nicht detektiert wurde nach Szenario 1 (Formel 60)

-
- $P134_{S_z 1, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt } 2}^{\text{Personal}} = 0,18$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs (Schritt 1) und 1 km Fahrt auf der freien Strecke detektiert wurde nach Szenario 1 (Formel 61)
 - $\bar{P}135_{S_z 1, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt } 3}^{\text{Personal}} = 0,77$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs und 2 km Fahrt auf der freien Strecke nicht detektiert wird nach Szenario 1 (Formel 62)
 - $P136_{S_z 1, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt } 3}^{\text{Personal}} = 0,23$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs und 2 km Fahrt auf der freien Strecke detektiert wurde nach Szenario 1 (Formel 63)
 - $\bar{P}137_{S_z 1, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt } 6}^{\text{Personal}} = 0,65$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs (Schritt 1) und 5 km Fahrt auf der freien Strecke nicht detektiert wurde nach Szenario 1 (Formel 64)
 - $\bar{P}138_{S_z 1, \text{Heißläuferdetektion}, \text{Schritt } 7}^{\text{Personal}} = 0,64$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs (Schritt 1) und 5,313 km Fahrt auf der freien Strecke nicht detektiert wurde nach Szenario 1 (Formel 64)
 - $s139_{P=0,5}^{S_z 1} = 7,94 \text{ km}$; Abstand zwischen dem Beginn des Szenarios 1 und dem Punkt, an dem die Kurve den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht in [km] (Formel 65)
 - $s140_{P=0,5}^{S_z 2} = 8,897 \text{ km}$; Abstand zwischen dem Beginn des Szenarios 2 und dem Punkt, an dem die Kurve den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht in [km] (Tabelle 7)
 - $s141_{P=0,5}^{S_z 1-2} = 8,644 \text{ km}$; mittlerer Abstand zwischen dem Beginn der Wahrnehmbarkeit des Lager-Heißläufers und dem Punkt, an dem die Kurve den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht, über beide Szenarien in [km] (Formel 66)
 - $P142_{\text{Zugbeobachtung}, \text{Bf}, \text{pess}}^{\text{Personal}} = 0,1$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug bei der Fahrt durch den Bahnhof von einem Zugbeobachter beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3)
 - $P143_{\text{Zugbeobachtung}, \text{Stw}, \text{fS}, \text{pess}}^{\text{Stellwerkpersonal}} = 0,1$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug bei der Vorbeifahrt an einem Stellwerk der freien Strecke von einem Stellwerksmitarbeiter beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3)

-
- $P144^{\text{Personal der PVA-fS}}$
 $\text{Zugbeobachtung, PVA-fS, pess} = 0,1$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einer PVA-fS von dessen Personal beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3)
 - $P145^{\text{PBÜ - Personal}}$
 $\text{Zugbeobachtung, PBÜ, fS, pess} = 0,5$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer bei Vorbeifahrt an einem Bahnübergang der freien Strecke von dessen Personal beobachtet wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3)
 - $P146^{\text{Personal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion, Bf, pess} = 0,05$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit einem Lager-Heißläufer bei der Durchfahrt im Bahnhof durch das dort tätige Personal detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 68)
 - $P147^{\text{Stellwerkpersonal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess} = 7 * 10^{-4}$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke durch einen Stellwerksmitarbeiter detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 69)
 - $P148^{\text{PBÜ - Personal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess} = 0,025$; Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke von Personal am Bahnübergang detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 70)
 - $P149^{\text{Personal der PVA-fS}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess} = 6 * 10^{-4}$; Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zug mit Lager-Heißläufer pro km Fahrt auf der freien Strecke vom Personal einer PVA-fS detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 71)
 - $P150^{\text{Personal}}$
 $\text{Heißläuferdetektion pro km, fS, pess} = 0,027$; Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug mit Lager-Heißläufer pro gefahrenem Kilometer der freien Strecke durch Personal detektiert wurde nach dem pessimistischen Ansatz (Formel 75)
 - $P151^{\text{Personal}}$
 $\text{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1} = 0,025$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz (Formel 76)
 - $\bar{P}152^{\text{Personal}}$
 $\text{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 1} = 0,98$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs durch Personal nicht detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz (Formel 77)
 - $\bar{P}153^{\text{Personal}}$
 $\text{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt 2} = 0,95$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs und nach weiterer 1 km Fahrt auf

der freien Strecke durch Personal nicht detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz (Formel 78)

- $P154_{Sz1, pess, Heißläuferdetektion, Schritt\ 2}^{Personal} = 0,05$; Wahrscheinlichkeit, dass der Zug mit Lager-Heißläufer bei der Fahrt durch die Hälfte des Bahnhofs und nach weiterer 1 km Fahrt auf der freien Strecke durch Personal detektiert wurde nach dem Szenario 1 und dem pessimistischen Ansatz (Formel 79)
- $s155_{P=0,5}^{Sz\ 1-2, pess} = 25,6\ km$; mittlerer Abstand zwischen dem Beginn der Zugfahrt mit Lager-Heißläufer und dem Punkt, an dem die Kurve in Abbildung 58 den Wahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht, über alle Szenarien nach dem pessimistischen Ansatz (Kapitel 5.3.3)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gegenüberstellung der verwendeten Begriffe im Zusammenhang mit HOA/FBOA-Detektionen in [RIL 859] und [RIL 408.0553], wobei die ersten drei Alarme durch Schäden am Radsatzlager und die letzten beiden Alarme durch Schäden an der Bremse verursacht werden; „ ¹⁾ Ein Warm- bzw. Heißalarm wird bei einer Temperaturdifferenz von 70 bzw. 100 K zwischen der gemessenen und der Außentemperatur ausgelöst. Außentemperaturen $>+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden nicht berücksichtigt [RIL 859].“ 9
Tabelle 2:	Vorgeschlagene Werte für die menschliche Fehlerrate in verschiedenen Situationen und unter verschiedenen Belastungen in einem sicherheitlichen Mensch-Maschine-System [HINZ 1993] 32
Tabelle 3:	Übersicht der bis hier in dieser Arbeit errechneten Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$, wobei die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten für die Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik kleiner sind, als die der Ereignisketten für das Stellen von Zügen mit Heißläufer an der 3H-Tafel 100
Tabelle 4:	Gegenüberstellung sämtlicher in dieser Arbeit errechneter Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ 133
Tabelle 5:	Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 19 des Szenarios 1 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Wahrscheinlichkeitswerten 155
Tabelle 6:	Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 19 des Szenarios 2 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Wahrscheinlichkeitswerten 157
Tabelle 7:	Darstellung des Abstands zwischen dem Beginn der Zugfahrt mit Lager-Heißläufer und dem Punkt, an dem die Kurve aus Abbildung 54 den Detektionswahrscheinlichkeitswert 0,5 erreicht in [km] für die Szenarien 1 und 2 160
Tabelle 8:	Gleichung zur Berechnung der Absolut- und Differenztemperaturen der drei Szenarien nach [SCHÖ 2005] 162

Tabelle 9:	Darstellung der Szenarien „Beobachtung“, „worst case“ und „Bemessung“ nach den in [SCHÖ 2005] angegebenen Gleichungen; Temperaturen, ab denen der Mensch Lager-Heißläufer detektieren kann, sind blau gekennzeichnet; Temperaturen, ab denen die HOA einen Alarm auslöst in Abhängigkeit zur Außentemperatur: 0 °C rote Zahl, +30 °C braune Zahl, - 30 °C grüne Zahl; Temperaturdifferenzen, ab denen eine HOA einen Alarm „Differenz Heiß“ auslöst, sind ebenfalls rot dargestellt.....	163
Tabelle 10:	Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 27 des Szenarios 1 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Wahrscheinlichkeitswerten nach dem pessimistischen Ansatz.....	173
Tabelle 11:	Darstellung der Ergebnisse der Berechnungsschritte 1 bis 27 des Szenarios 2 mit auf zwei Stellen nach dem Komma gerundeten Werten nach dem pessimistischen Ansatz.....	174
Tabelle 12:	Errechnete Werte für den notwendigen Abstand zwischen zwei HOA zur Kompensation der seit 1983 entfallenen Zugbeobachtungen durch den Rückzug der örtlichen Personale nach dem realistischen Ansatz und dem pessimistischen Ansatz	177
Tabelle 13:	Gegenüberstellung der in dieser Arbeit errechneten Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten.....	184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einschaltsschienenkontakt einer HOA/FBOA, der an der Schiene befestigt ist [FIS 2013].....	5
Abbildung 2:	Öffnung zur Messung von Fester Bremse (rot umrandet) und zur Messung der Radsatzlagertemperatur (blau umrandet) [FIS 2013].....	6
Abbildung 3:	Prinzip der berührungslosen Temperaturmessung der Radsatzlager (außerhalb der Schienen) zur Erkennung von Radsatzlagerschäden sowie der Radreifen (innerhalb der Schienen) zur Identifikation von während der Fahrt anliegenden Bremsen [SST 2013].....	7
Abbildung 4:	Darstellung der Anordnung der nach [RIL 859] erforderlichen 12 Stellsignale im Umkreis von ca. 12 km einer HOA/FBOA-Doppelanlage (gelb), bestehend aus zwei Zweirichtungsanlagen und eingerichtetem Gleiswechselbetrieb bei Strecken mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von mehr als 250 km/h.....	14
Abbildung 5:	Übersicht der heutigen Maßnahmen bei Ausfall von HOA oder FBOA, basierend auf [RIL 408.0641], [END 2007] und [KLIM 2008]	17
Abbildung 6:	Darstellung der rot gekennzeichneten Vergleichsebene, in der die Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisketten nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik und der nachfolgend in dieser Arbeit entwickelten Ereignisketten verglichen werden	19
Abbildung 7:	Darstellung der Abläufe 1. bis 6. des Stellens von Zügen mit detektiertem Heißläufer und des Aussetzens des beschädigten Fahrzeugs nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik	23
Abbildung 8:	Informationsfluss für die HOA-Alarmmeldung bis zur Anzeige auf der MRE	26
Abbildung 9:	Pfeildarstellung der Formel 6.....	34
Abbildung 10:	Pfeildarstellung eines Systems in Reihenanordnung mit drei Elementen [HINZ 1993].....	35
Abbildung 11:	Pfeildarstellung eines Systems in Parallelanordnung mit vier Elementen [HINZ 1993].....	36
Abbildung 12:	Pfeildarstellung der Formel 7.....	37
Abbildung 13:	Vereinfachte Darstellung einer GSM-R-Funkverbindung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer (schwarze Pfeile) und den Möglichkeiten der Rückfallebene für den Fahrdienstleiter (rote Pfeile) und für den Triebfahrzeugführer (blaue Pfeile), abgeleitet aus [LAS 2001] und [GSMR 2011]	39

Abbildung 14:	Pfeildarstellung der Formel 12.....	47
Abbildung 15:	Pfeildarstellung der Formel 13.....	49
Abbildung 16:	Pfeildarstellung der Formel 15.....	52
Abbildung 17:	Pfeildarstellung der Formel 17.....	56
Abbildung 18:	Pfeildarstellung der Formel 18.....	57
Abbildung 19:	Darstellung eines Basisereignisses, eines UND-Gatters und eines ODER-Gatters (von links nach rechts), Symbolik aus [FTP 2013].....	61
Abbildung 20:	Basisereignis, Zwischenereignis als Ergebnis eines ODER-Gatters, Zwischenereignis als Ergebnis eines UND-Gatters, Gesamtversagensereignis einer Ereigniskette (von oben links nach unten rechts) mit Formelzeichen im oberen Rechteck und mit Angabe des zugehörigen Versagens- bzw. Gesamtversagenswahrscheinlichkeitswertes „Q=“	61
Abbildung 21:	Basis- und Zwischenereignisse in einem Fehlerbaum, dargestellt mit der Software „FaultTree+“	62
Abbildung 22:	Darstellung eines UND-Gatters ohne gleichzeitige Funktion eines Zwischenereignisses.....	63
Abbildung 23:	Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F_{30}^{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, ETCS - Strecke, Ballungsraum}}$ unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$	65
Abbildung 24:	Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach heutigen anerkannten Regeln der Technik mit der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit $F_{30}^{\text{Stellung ; ARdT, PZB90, ETCS - Strecke, Ballungsraum}}$ unter Anwendung der exakten Berechnung der ODER-Verknüpfung mithilfe der Gleichung $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$	67
Abbildung 25:	Gesamtversagenswahrscheinlichkeit der Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter und PZB-überwachter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach heutigen	

	anerkannten Regeln der Technik $F31$ _{Stellung ; ARdT, PZB90, sonstige Strecken} unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$	69
Abbildung 26:	Ungewollte Zwangsbremmung nach einer Heißläuferdetektion durch den Haltfall eines zwischen der detektierenden HOA und dem vorgesehenen Stell-LBK gelegenen Hauptsignals, abgeleitet aus [EBA 2002].....	71
Abbildung 27:	Darstellung der Abläufe des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs	73
Abbildung 28:	Pfeildarstellung der Formel 19.....	74
Abbildung 29:	Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik mit $F32$ _{Stellung ; ARdT, LZB-Führung, ETCS-Strecke, Ballungsraum} unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung	77
Abbildung 30:	Pfeildarstellung der Formel 20.....	78
Abbildung 31:	Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter, LZB-geführter Züge einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken nach den heutigen anerkannten Regeln der Technik mit $F34$ _{Stellung ; ARdT, LZB-Führung, sonstige Strecken} unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung	80
Abbildung 32:	Darstellung der Abläufe nach einer HOA-Detektion mit der Stellung an der 3H-Tafel bis zum Aussetzen des detektierten Fahrzeugs	85
Abbildung 33:	Pfeildarstellung der Formel 21	88
Abbildung 34:	Pfeildarstellung der Formel 22.....	90
Abbildung 35:	Eisenbahnstrecke mit problematischer Vegetationssituation [DRO 2007].....	92
Abbildung 36:	Pfeildarstellung der Formel 24.....	93
Abbildung 37:	Fehlerbaum für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen mit $F40$ _{Stellung an 3H-Tafel ; ETCS-Strecke, Ballungsraum} unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung	95
Abbildung 38:	Pfeildarstellung der Formel 25.....	96

Abbildung 39:	Fehlerbaum für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs auf sonstigen Strecken mit $f_{41}^{\text{Stellung an 3H-Tafel; sonstige Strecke}}$ unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung	98
Abbildung 40:	Darstellung der Abläufe des Stellens von Zügen mit Heißläufer an der 3H-Tafel einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs und mit direkter HOA-Alarmmeldungsübertragung zum Triebfahrzeugführer (schwarze Pfeile) und redundanter HOA-Alarmmeldungsübertragung an den Fahrdienstleiter (orange Pfeile) mit HOA-Alarmmeldungsabgleich zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer.....	102
Abbildung 41:	Pfeildarstellung der Formel 27	111
Abbildung 42:	Pfeildarstellung der Formel 28.....	112
Abbildung 43:	Pfeildarstellung der Formel 29.....	114
Abbildung 44:	Pfeildarstellung der Formel 30.....	115
Abbildung 45:	Pfeildarstellung der Formel 31, wobei die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{11}^{\text{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen.“ (Formel 8) im unteren Pfad die Verbindung zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer betrifft. Im oberen Pfad bezieht sich $f_{11}^{\text{GSM-R-Technik; ETCS-Strecke, Ballungsraum}}$ auf die fernmündliche Verbindung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer.....	117
Abbildung 46:	Pfeildarstellung der Formel 32, wobei die Versagenswahrscheinlichkeit $f_{12}^{\text{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}}$ (Formel 9) für das Ereignis: „Die GSM-R-Technik ermöglicht eine fernmündliche Verbindung auf sonstigen Strecken.“ im unteren Pfad die Verbindung zwischen der Kommunikationseinheit und dem Triebfahrzeugführer betrifft. Im oberen Pfad bezieht sich $f_{12}^{\text{GSM-R-Technik; sonstige Strecke}}$ auf die fernmündliche Verbindung zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Triebfahrzeugführer.....	119
Abbildung 47:	Pfeildarstellung der Formel 33.....	120
Abbildung 48:	Pfeildarstellung der Formel 41, wobei $f_{42}^{\text{HOA-MAS90-redundant}}$ die Versagenswahrscheinlichkeit zu 1., $f_{50}^{\text{Tf, Fdl}}$ redundanter Teil; ETCS-Strecke, Ballungsraum die Versagenswahrscheinlichkeit zu 2. bis 5b., f_{52}^{Tf} Identifikation Achse mit KE	

	die Versagenswahrscheinlichkeit zu 6. und f_{29}^{Tf} Aussetzen die Versagenswahrscheinlichkeit zu 7. in Abbildung 40 beinhalten.	127
Abbildung 49:	Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf Strecken mit ETCS bzw. in Ballungsräumen mit F_{53} <small>Stellung an 3H-Tafel mit KE; ETCS-Strecke, Ballungsraum</small> unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung	129
Abbildung 50:	Pfeildarstellung der Formel 42, wobei $f_{42}^{HOA-MAS90-redundant}$ die Versagenswahrscheinlichkeit zu 1., $f_{51}^{Tf,Fdl}$ <small>redundanter Teil; sonstige Strecke</small> die Versagenswahrscheinlichkeit zu 2. bis 5b., f_{52}^{Tf} <small>Identifikation Achse mit KE</small> die Versagenswahrscheinlichkeit zu 6. und f_{29}^{Tf} Aussetzen die Versagenswahrscheinlichkeit zu 7. in Abbildung 40 beinhalten.	130
Abbildung 51:	Darstellung des Fehlerbaums für die Ereigniskette des Stellens HOA-detektierter Züge an der 3H-Tafel statt am Stellsignal einschließlich des Aussetzens des Heißläuferfahrzeugs mit zusätzlicher HOA-Alarmmeldungsübermittlung direkt zum Triebfahrzeugführer auf sonstigen Strecken mit F_{54} <small>Stellung an 3H-Tafel mit KE; sonstige Strecke</small> unter Nutzung der Näherung für die ODER-Verknüpfung.....	132
Abbildung 52:	Durchschnittliche Folge von Bahnhöfen und Abschnitten der freien Strecke im Netz der Deutschen Bundesbahn im Jahr 1983.....	145
Abbildung 53:	Darstellung der beiden Szenarien für den Beginn der Wahrnehmbarkeit eines Lager-Heißläufers durch Personal	153
Abbildung 54:	Wahrscheinlichkeit für die Detektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer nach dem Beginn dessen Wahrnehmbarkeit durch Personal bei Kilometer 0 in Abhängigkeit von der vom Zug gefahrenen Wegstrecke für die Szenarien 1 und 2	158
Abbildung 55:	Darstellung der Bestimmung des Abstands zwischen dem Beginn der Wahrnehmbarkeit des Lager-Heißläufers bei Szenario 1 (Tabelle 5) und dem Punkt, an dem der Wert der Detektionswahrscheinlichkeit 0,5 erreicht wird.....	159
Abbildung 56:	Entwicklung der Temperaturen des Differenzalarms der drei Szenarien in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg nach Entstehung des Lager-Heißläufers.....	164

Abbildung 57:	Entwicklung der Lager-Heißläufertemperaturen der drei Szenarien in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg nach Entstehung des Lager-Heißläufers nach Tabelle 9 bis zur Detektierbarkeit durch den Menschen ab 525 °C	165
Abbildung 58:	Wahrscheinlichkeit für die Detektion eines Zuges mit Lager-Heißläufer nach Beginn der Wahrnehmbarkeit des Lager-Heißläufers durch Personal bei Kilometer 0 in Abhängigkeit von der vom Zug gefahrenen Wegstrecke für die Szenarien 1 und 2 nach dem pessimistischen Ansatz	175
Abbildung 59:	Gegenüberstellung der Abstände der Zugbeobachter im Jahr 1983 und der zu deren Kompensation zu installierenden HOA im anzustrebenden Abstand von 50 km.....	178
Abbildung 60:	Beispiel für die Verteilung der Zugbeobachter (schwarz dargestellte Personen) bei ausgefallener HOA am km 0 in Fahrtrichtung C-Stadt, bei der eine einseitige Detektion eines Lager-Heißläufers nach spätestens 8 km sichergestellt ist	179
Abbildung 61:	Gegenüberstellung der heutigen Maßnahmen bei Ausfall von HOA aus Abbildung 5 für Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 200 km/h, zusammengestellt aus [END 2007], [KLIM 2008], oben; unten mit den aus den Ergebnissen dieser Arbeit abzuleitenden Maßnahmen.....	181
Abbildung 62:	Regellichraum in der Geraden und im Bogen bei Radien von 250 m und mehr aus [EBOW 2012], Freihaltung des von der Grenzlinie umschlossenen Raumes gemäß [EBO 2012], § 9 Abs. 3 erforderlich, soweit es sich nicht um Einrichtungen zum Reinigen oder Instandsetzen von Fahrzeugen handelt und diese Gleise nicht nur dafür verwendet werden, Maße in [mm].....	225
Abbildung 63:	Dreidimensionale Darstellung des Regellichtraums mit Koordinatensystem..	226
Abbildung 64:	Dreidimensionale Darstellung des sicherungstechnisch gesicherten Regellichtraums, begrenzt in der z-Achse im Sinne der Abbildung 63 durch die Endlichkeit des gesicherten Fahrwegs	227

Abkürzungsverzeichnis

3H-Tafel	HOA-Hektometer-Halt-Tafel
Basa-Netz	Bahnselbstanschlußanlage
BÜP	Bahnübergangsposten
BZ	Betriebszentrale
DBMAS	DB Meldeanlagensystem
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EdB	Eisenbahnen, die sich mehrheitlich im Besitz des Bundes befinden
EN	Europäische Normen
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System
EUB	Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes
F	Fahrweg, Abkürzung aus [NAU 2002]
Fdl	Fahrdienstleiter
fS	freie Strecke
GeFo	GSM-R Fernsprecher ortsfest
GNT	Geschwindigkeitsüberwachung Neigetechnik
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Rail
HOA/FBOA	Heißläufer- und Festbremsortungsanlage (ab Kapitel 4 als „HOA“ abgekürzt)
Indusi	Induktive Zugbeeinflussung
KE	Kommunikationseinheit
LBK	LZB-Blockkennzeichen
LeiBIT	Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung
LeiTFÜ-G	Leitsystem der Betriebsführung zur Fahrwegüberwachung - Betriebliche Gefahrenmeldeanlagen

Lpw	Lokpersonalwechsel
LZB	Linienzugbeeinflussung bzw. linienförmige Zugbeeinflussung
MAS 90	Meldeanlagensystem 90
MSC	Vermittlungsstelle im Mobilfunknetz GSM-R
MRE	Melde- und Registriereinheit
P-GSM (D)	Public-Global System for Mobile Communications Deutschland
PBÜ	mit Personal besetzter Bahnübergang
pess	pessimistischer Ansatz
PVA-fS	Personenverkehrsanlage der freien Strecke
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
SFS	Schnellfahrstrecke
STE-Anlagen	Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnische Anlagen
Sz	Szenario
TEN	Transeuropäisches Netz
Tf	Triebfahrzeugführer
TSI	Technische Spezifikation
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
ZLV-Bus	Zuglaufverfolgungsbuss
ZMRE	Zentrale Melde- und Registriereinheit
ZMS	Zentrale Melde Stelle
ZND	Zugnummerdecoder
ZSE	Zentrale Steuereinheit

Literaturverzeichnis

- [AND 2008] Enrico Anders, „Ein Beitrag zur ganzheitlichen Sicherheitsbetrachtung des Bahnsystems“, Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften ”Friedrich List“ der TU-Dresden, 2008
- [BET 1962] Deutsche Bundesbahn, „Überblick über den Betriebsdienst“, Eisenbahn-Lehrbücherei der deutschen Bundesbahn, Band 30, 4. Auflage, 1962
- [BLAU 1983] Deutsche Bundesbahn, „Statistische Angaben über die Deutsche Bundesbahn (Blaubuch) im Geschäftsjahr 1983“, Zentralstelle für Betriebswirtschaft und Datenverarbeitung, Frankfurt Main, Erscheinungsjahr nicht angegeben
- [BRA 2005] Jens Braband, „Risikoanalysen in der Eisenbahn-Automatisierung“, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co KG, 2005
- [BRAN 2011] Jochen Brandau, „Rückfallkonzept für den GSM-R-Zugfunk“, DB Deine Bahn, 10/2011
- [CLIF 2005] Clifton A. Ericson, II, „Hazard Analysis Techniques for System Safety“, JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, Fredericksburg, Virginia, 2005
- [DBNE 2012] DB Netze, „Die Ausbau- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel Verkehrsachse für Europa“, 02/2012
- [DBMAS 2010] Heinz-Andreas Kuhn, „DBMAS – Neue Anwendungsplattform für die Infrastrukturüberwachung“, SIGNAL + DRAHT, 7/8 2010

- [DEBA 1985] Wolfgang Müller, „Sicherung von Bahnübergängen“, DB Deine Bahn, 1/1985
- [DRO 2007] Sigurd Lettau, Fotografie, Internetportal Drehscheibe-Online, <http://www.drehscheibe-foren.de/foren/read.php?4,3373603,3373603#msg-3373603>, eingestellt ins Internet 2007, Stand 15.10.2009, 19 Uhr
- [EBA 2002] Eisenbahn-Bundesamt, Schreiben Geschäftszeichen 22.48 SAV 819/1601, „Neuherausgabe des Planungsmoduls 819.1601“, Berlin, 2002
- [EBO 1982] Deutsche Bundesbahn, „Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)“, vom 08. Mai 1967 (Bundesgesetzblatt 1967, Teil II, Seite 1563), Ausgabe 1982 (Berichtigungsblätter 1 und 2 sind eingearbeitet)
- [EBO 2012] Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 25. Juli 2012 (BGBl. I S. 1703) geändert worden ist
- [EBOK 2001] Pätzold/Wittenberg/Heinrichs/Mittmann, „Kommentar zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)“, Hestra-Verlag Darmstadt, 4. Auflage, 2001
- [EBOW 2012] Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 25. Juli 2012 (BGBl. I S. 1703) geändert worden ist, Bild aus <http://www.wedebruch.de/gesetze/betrieb/eboanl.htm> am 09.05.2013, 19 Uhr

- [EIS1 2000] Erich Eisenbrand, „PHOENIX MB – Intelligente Heißläuferortung und Fahrwerküberwachung in der betrieblichen Praxis“, SIGNAL + DRAHT, 7/8 2000
- [EIS2 2000] Erich Eisenbrand, „Betriebserfahrungen mit der neuen Heißläuferortungsanlage PHOENIX MB“, SIGNAL + DRAHT, 12/2000
- [EIS 2001] Erich Eisenbrand, „PHOENIX MB: Die neue Dimension in der Heißläuferortung“, SIGNAL + DRAHT, 5/2001
- [EIS 2011] Erich Eisenbrand, „Hot Box detection in European railway networks“, RTR Special, 2011
- [EN 50126] Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE), „Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) Deutsche Fassung EN 50126“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 03/2000
- [EN 50129] DKE Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE DIN EN, „Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Sicherheitsrelevante Kommunikation in Übertragungssystemen; Deutsche Fassung EN 50129:2010“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 04/2011
- [END 2007] Dirk H. Enders, „Betriebliche Maßnahmen bei gestörten Heißläufer- oder Festbremsortungsanlagen“, BahnPraxis, Eisenbahn-Unfallkasse, Frankfurt Main, 6/2007

- [EPRI 1984] Electric Power Research Institute (EPRI), „Systematic Human Action Reliability Procedure (SHARP)“, EPRI-NP-3583, Project 2170-3 Interim Report, San Diego California, June 1984, Appendix A, Seite A-1 ff, Quelle wird nur über die Sekundärquelle [HINZ 1993] zitiert
- [ETR 1956] Von leitenden Männern der Deutschen Bundesbahn, „Mechanische Feststellung von Heißläufern und Radreifenflachstellen“, Eisenbahntechnische Rundschau, 07/1956
- [EUB BACH] Untersuchungszentrale der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes, „Untersuchungsbericht“, Zugentgleisung 01.09.2010, Bacharach, 30.05.2012
- [EUB ENDO] Untersuchungszentrale der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes, „Untersuchungsbericht“, Zugentgleisung 08.04.2011, Bad Endorf, 30.05.2012
- [EUB HERL] Untersuchungszentrale der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes, „Untersuchungsbericht“, Zugentgleisung 05.03.2010, Herlasgrün, 02.07.2012
- [EUB ROTH] Untersuchungszentrale der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes, „Untersuchungsbericht“, Zugentgleisung 28.02.2007, Rotenburg/Wümme, 15.01.2013
- [FELT 2009] K. Felten, „Internet Network infrastucture [sic!]“, Fachhochschule Kiel, 09.12.2009
- [FIS 2012] Ralph Fischer, „Projekt ‚Überlange Güterzüge‘ bei der DB Netz AG aus Sicht des EBA“, EI-Eisenbahningenieur, 07/2012

- [FIS 2013] Ralph Fischer, Fotografie, HOA/FBOA Deining, 12.03.2013
- [FREU 1996] Guido Freudiger, „Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen der neuen Generation bei der SBB“, SIGNAL + DRAHT, 10/96
- [FTP 2013] Isograph Inc, Software „FaultTree+“, Version 11.1, Canada, Softwarestand 2013
- [FV 1976] Deutsche Bundesbahn, „Fahrdienstvorschrift (FV)“, DV 408 vom 28. Mai 1972, Berichtigung 1, 1973, Berichtigung 2, 1974, Berichtigung 1975, Berichtigung 4 1976
- [FV 1984] Deutsche Bundesbahn, „Fahrdienstvorschrift (FV)“, DS 408, 3. Juni 1984
- [GSMR 2011] DB Netze, erstellt durch DB Netz AG, „GSM-R Schulung GSM-R allgemeiner Teil“, Version 1.1, 28.05.2011
- [HCE 1997] DB AG, „Funktionsbedingungen der Stellwerkslogik und der in das ESTW integrierten Technik“, Teilheft F8 Hochleistungsblock CIR – ELKE, München, 1997
- [HINZ 1993] Albrecht Hinzen, „Der Einfluss des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn“, Veröffentlichung des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Heft 48, 1993

- [JOCH 2004] Werner Jochim, „Punktförmiges Zugbeeinflussungssystem PZB 90 Registrierung und Datenspeicherung“, BahnPraxis, Eisenbahn-Unfallkasse, Frankfurt Main, 2/2004
- [JUER 2003] Jürgen Jacobs, „Rechnerunterstützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs“, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2003
- [KLIM 2008] Wolfgang Klima, Markus Stern, „Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen bei der DB Netz AG“, BahnPraxis, Eisenbahn-Unfallkasse, Frankfurt Main, 3/2008“
- [KNEW 2006] Rainer Knewitz, „Hundert Jahre Bahn-Telekommunikation“, SIGNAL + DRAHT, 1+2/2006
- [LAS 1993] Zentrale der DB, Zentrale der DR, „Integriertes Melde- und Überwachungsverfahren – Betriebliches Lastenheft –“, 9/93
- [LAS 2001] DB Netz AG, „Lastenheft GSM-R Funknetz für die DB Netz AG“, 14.12.2001
- [LAS 2010] Deutsche Bahn AG, „Ortsfeste Heißläufer- und Festbremsortungssysteme HFS – Lastenheft 416.0160“, Version 1.1, 09.11.2010
- [LVTU 2009] Eric Schöne, „Sicherheit an Bahnübergängen“, ein Lehrfilm für Schiene und Straße, Technische Universität Dresden, Professur für Verkehrssicherungstechnik, Union Druckerei Dresden GmbH, 2009

- [LZB 1997] Alcatel SEL, „LZB 72 CE Systembeschreibung“, Ausgabe 02, Stuttgart, 1997
- [MASC 2009] Ulrich Maschek, „Eine generische Sicht auf die Betriebssicherheit im spurgeführten Verkehr“, EI-Eisenbahningenieur, 02/2009
- [MASC 2012] Ulrich Maschek, „Sicherung des Schienenverkehrs“, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2012
- [MASC ETR] Ulrich Maschek, „Zur Berechnung der menschlichen Zuverlässigkeit aus Vorbeifahrten an Halt zeigenden Signalen“, ETR, 05/2012
- [MDR 2013] MDR Internetseite, „Vorplanung kann beginnen Ausbau der Bahnstrecke Chemnitz-Leipzig besiegelt“, http://www.mdr.de/sachsen/bahnausbau102_zc-f1f179a7_zs-9f2fed56.html, Stand 10.05.2013, 15:10 Uhr
- [NASA 2002] NASA Office of Safety and Mission Assurance, „Fault Tree Handbook with Aerospace Applications“, Washington DC, August 2002
- [NAU 2002] Peter Naumann, Jörn Pacht, „Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb“, Fachlexikon, Tetzlaff Verlag GmbH & Co KG, Hamburg, 2002
- [PACH 1982] Jörg Pachnicke, „Technik der Heißläuferortungsanlagen (HOA) für die 2. Ausbaustufe“, Elseners Taschenbuch der Eisenbahntechnik, Tetzlaff Verlag GmbH, Darmstadt, 1982

- [PACH 1992] Klaus Hohnstädt, Jörg Pachnicke, „Heißläuferortungsanlagen für Schnellfahrstrecken der Deutschen Bundesbahn“, Eisenbahningenieurkalender 92, Tetzlaff Verlag GmbH, Hamburg, 1992
- [PÖHL 1992] Hans-Dieter Pöhls, „Heißläufer- und Festbremsortungssysteme für Hochgeschwindigkeitsverkehre“, Eisenbahningenieur 43, 09/1992
- [PÖHL 1994] Hans-Dieter Pöhls, Thomas Pilz, „Moderne Betriebsführung mit neuem HOA-Standard“, SIGNAL + DRAHT, 06/1994
- [PROG 2012] Progress Rail Inspection & Information Systems GmbH, „Das Meldeanlagen-System MAS90“, Foliensatz, 2012
- [PZB 2001] DB Netz AG, „Punktförmiges Zugbeeinflussungssystem PZB 90 Systembeschreibung“, Frankfurt Main, 08/2001
- [RIL 107] DB AG, Richtlinie 107, „Tauglichkeit und Eignung feststellen“, 01.04.2009
- [RIL 408] DB Netz AG, Richtlinie 408, „Züge fahren und Rangieren“, Bekanntgabe 11 zum 09.12.2012
- [RIL 408.0221] DB Netz AG, Richtlinie 408, Modul 408.0221, „Züge fahren und Rangieren“, Bekanntgabe 11 zum 09.12.2012
- [RIL 408.0456] DB Netz AG, Richtlinie 408, Modul 408.0456, „Züge fahren und Rangieren“, Bekanntgabe 11 zum 09.12.2012

- [RIL 408.0553] DB Netz AG, Richtlinie 408, Modul 408.0553, „Züge fahren und Rangieren“, Bekanntgabe 11 zum 09.12.2012
- [RIL 408.0641] DB Netz AG, Richtlinie 408, Modul 408.0641, „Züge fahren und Rangieren“, Bekanntgabe 11 zum 09.12.2012
- [RIL 408.0652] DB Netz AG, Richtlinie 408, Modul 408.0652, „Züge fahren und Rangieren“, Bekanntgabe 11 zum 09.12.2012
- [RIL 456] DB Netz AG, Richtlinie 456, „Bahnbetrieb Schrankenwärterdienst Regeln für Schrankenposten“, 11.12.2011
- [RIL 481.0205] DB Netz AG, Richtlinie 481.0205, „Grundlagen für Verbindungen des Zugfunks im GSM-R Netz“, 09.12.2008
- [RIL 481.0205 Z03] DB Netz AG, Richtlinie 481.0205 Z03, „Zugfunkteilnehmer bei GSM-R-Störungen erreichen“, 05.06.2011
- [RIL 482.9025] DB Netz AG, Richtlinie 482.9025, „Streckeneinrichtungen der Linienzugbeeinflussung (LZB)“, 20.11.2007
- [RIL 483.0201] DB Netz AG, Richtlinie 483.0201, „Linienförmige Zugbeeinflussungsanlagen bedienen; Allgemeiner Teil“, 15.04.2009
- [RIL 483.0202] DB Netz AG, Richtlinie 483.0202, „Linienförmige Zugbeeinflussungsanlagen bedienen; LZB 80-Fahrzeugeinrichtungen“, 15.04.2009

- [RIL 819.1310] DB Netz AG, Richtlinie 819, Modul 819.1310, „Induktive punktförmige Zugbeeinflussung (PZB), Grundsätze für das Ausrüsten von Strecken“, 01.09.2007
- [RIL 819.1320] DB Netz AG, Richtlinie 819, Modul 819.1320, „LZB; Grundsätze für die Ausrüstung mit linienförmiger Zugbeeinflussung“, 01.11.2003
- [RIL 819.1601] DB Netz AG, Richtlinie 819, Modul 819.1601, „LST-Anlagen planen; Betriebliche Gefahrenmeldeanlagen; Heißläufer-/Festbremsortungsanlagen“, gültig vom 29.06.2006 bis 04.04.2013
- [RIL 859] DB Netz AG, Richtlinie 859, Modul 859.1703, „Betriebliche Gefahrenmeldeanlagen planen; Ortsfeste Heißläufer-/Festbremsortungsanlagen“, 05.04.2013
- [RIL 8591] DB AG, Richtlinie 859, Modul 859.1910, „Meldeanlagensysteme planen; Meldeanlagensystem MAS90“, 01.03.2011
- [RIL 883.0010] DB Netz AG, Richtlinie 883.0010, „Bahnstrecken kilometrieren“, 01.07.2008
- [RIL 915] Deutsche Bahn AG, Richtlinie 91501, Modul 915.0101, „Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen“, 11.12.2011
- [SCHÖ 05] Andreas Schöbel, „Zur Frage der Standortwahl von Zuglaufüberwachungseinrichtungen“, Dissertation, Technische Universität Wien, 03/2005

- [SCHÖ 2005] Andreas Schöbel, Johannes Karner, „Optimierungspotenziale bei der Stationierung von Heißläuferortungsanlagen“, ETR, 12/2005
- [SPDRS 1993] Jürgen Ernst, „Das Sp Dr S 60-Stellwerk“, DB Fachbuch, Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg Mainz, 1993
- [SST 2013] SST Signal & System Technik GmbH, „Systemschulung für Führungskräfte PHOENIX MB“, 2013
- [TEL 2013] Telekom Deutschland GmbH,
Internetseite http://www.t-mobile.de/funkversorgung/inland/0,,15400-_,00.html?wt_mc=ac_zm_9_25065, Stand 10.05.2013, 13:51 Uhr
- [THUM 2004] Andreas Thums, „Formale Fehlerbaumanalyse“, Dissertation, Universität Augsburg, 2004
- [TSI HS] DIE KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, „ENTSCHEIDUNG DER KOMMISSION vom 21. Februar 2008 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems ‚Fahrzeuge‘ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems (2008/232/EG)“, 2008
- [TSI SRT] DIE KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, „ENTSCHEIDUNG DER KOMMISSION vom 20. Dezember 2007 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich ‚Sicherheit in Eisenbahntunneln‘ im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem (2008/163/EG)“, 2008

- [TUD 2011] Holger Fricke, „Seminar Einschränkungsberechnung“, Technische Universität Dresden, Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik, 2011
- [UNLE 2013] Universal-Lexikon, Internetseite
http://universal_lexikon.deacademic.com/12024/gl%C3%BChen, am 05.05.2013, 15.04 Uhr
- [VERO 2009] DIE KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, „VERORDNUNG (EG) Nr. 352/2009 DER KOMMISSION vom 24. April 2009 über die Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken gemäß Artikel 6 Absatz 3 Buchstabe a der Richtlinie 2004/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates“, 2009
- [VVBA 2010] Eisenbahn-Bundesamt, „Verwaltungsvorschrift für die Bauaufsicht über Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnische Anlagen (VV BAU-STE)“, Ausgabe 4.51, gültig ab 01.06.2010
- [WETZ 1996] Gerd R. Wetzler, Peter Pickel, „Die betrieblichen Gefahrenmeldeanlagen im Netz der DB AG“, SIGNAL + DRAHT, 4/96

Anhang

Anhang 1

1. Der sicherungstechnisch gesicherte Regellichtraum

Bei jeder sicherheitlichen Betrachtung ist zu klären, ob sicherheitliche Schutzgüter, z. B. die „*Unversehrtheit von Personen und Gütern* [MASC 2012]“ tatsächlich beeinträchtigt werden könnte. Zur Beantwortung dieser Frage sind technische und juristische Ausführungen notwendig.

1.1 Der Regellichtraum nach § 9 der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [EBO 2012]

Im Zusammenhang mit HOA/FBOA ist zu begründen, ob diese Anlagen Sicherheitsbetrachtungen erfordern. Als Argumentationsgrundlage wird auf den Regellichtraum zurückgegriffen, da dieser rechtlich anerkannt und in [EBO 2012], § 9 festgeschrieben ist.

[EBO 2012] gilt für regelspurige Eisenbahnen des öffentlichen Verkehrs in der Bundesrepublik Deutschland und legt einen Raum fest, der für Eisenbahnfahrzeuge freizuhalten ist, damit es bei deren Fahrt nicht zu Kollisionen mit baulichen Anlagen jeglicher Art kommt. Der Regellichtraum muss darüber hinaus die Kinematik der Fahrzeuge umfassen. „*Die Neufassung der Vorschriften über den Regellichtraum berücksichtigt erstmals den tatsächlichen Raumbedarf der Fahrzeuge im Bewegungszustand (Kinematik)* [EBOK 2001].“ Hierzu gehören z. B. Schwingungen durch die Federung der Eisenbahnfahrzeuge während der Fahrt.

Für die Trennung der Zuständigkeit zwischen den Verantwortlichen des Fahrzeugbaus und des Anlagenbaus der Infrastruktur wurde die „Bezugslinie“ eingeführt. Hiervon ausgehend berechnen der Fahrzeughersteller nach innen die „Fahrzeugbegrenzungslinie“ und die Verantwortlichen für die Erstellung der Infrastruktur nach außen den notwendigen Lichtraumbedarf, wovon anschließend der einheitliche Regellichtraum abgeleitet wird. Vertiefende Ausführungen zur Thematik der Bezugslinie sind in [TUD 2011] enthalten.

Die Bezugslinie G2 gilt für in Deutschland verkehrende Fahrzeuge, die Bezugslinie G1 für Fahrzeuge im grenzüberschreitenden Verkehr [EBO 2012]. Die Fahrzeugmaße müssen den durch die jeweilige Bezugslinie zur Verfügung stehenden Raum nicht ausnutzen, da es sich bei den Maßen der Bezugslinien um maximale Werte handelt.

Weiter wird in [EBOK 2001] ausgeführt, dass der darin eingeführte Regellichtraum nunmehr auch die in der folgenden Abbildung 62 dargestellten freizuhaltenden Seitenräume A, B und C umfasst. Zulässige Einragungen in die Seitenräume sind in [EBO 2012], Anlage 1 geregelt.

Der Zusammenhang zwischen den Begriffen Lichtraumprofil, Lichtraum und Regellichtraum wird in [NAU 2002] definiert:

„Um den Schienenfahrzeugen das kollisionsfreie Fahren zu gewährleisten, sind die Gleise (einschließlich der ggf. vorhandenen Fahrleitung) von einem gedachten Tunnel zu umschließen, in den von außen keine Gegenstände hineinragen dürfen. Dieser Tunnel wird als Lichtraum, sein Querschnitt als Lichtraumprofil bezeichnet.“ „Ist der Lichtraum nicht eingeschränkt, wird er Regellichtraum genannt.“

Der Regellichtraum ist danach der Lichtraum, der nach den Regelungen in [EBO 2012] unter Beachtung der Bereiche A, B und C freizuhalten ist und somit ein Spezialfall des Lichtraumes. Die Seitenräume sind jedoch für die Betrachtungen in dieser Arbeit nicht von Bedeutung und werden daher nachfolgend nicht weiter berücksichtigt.

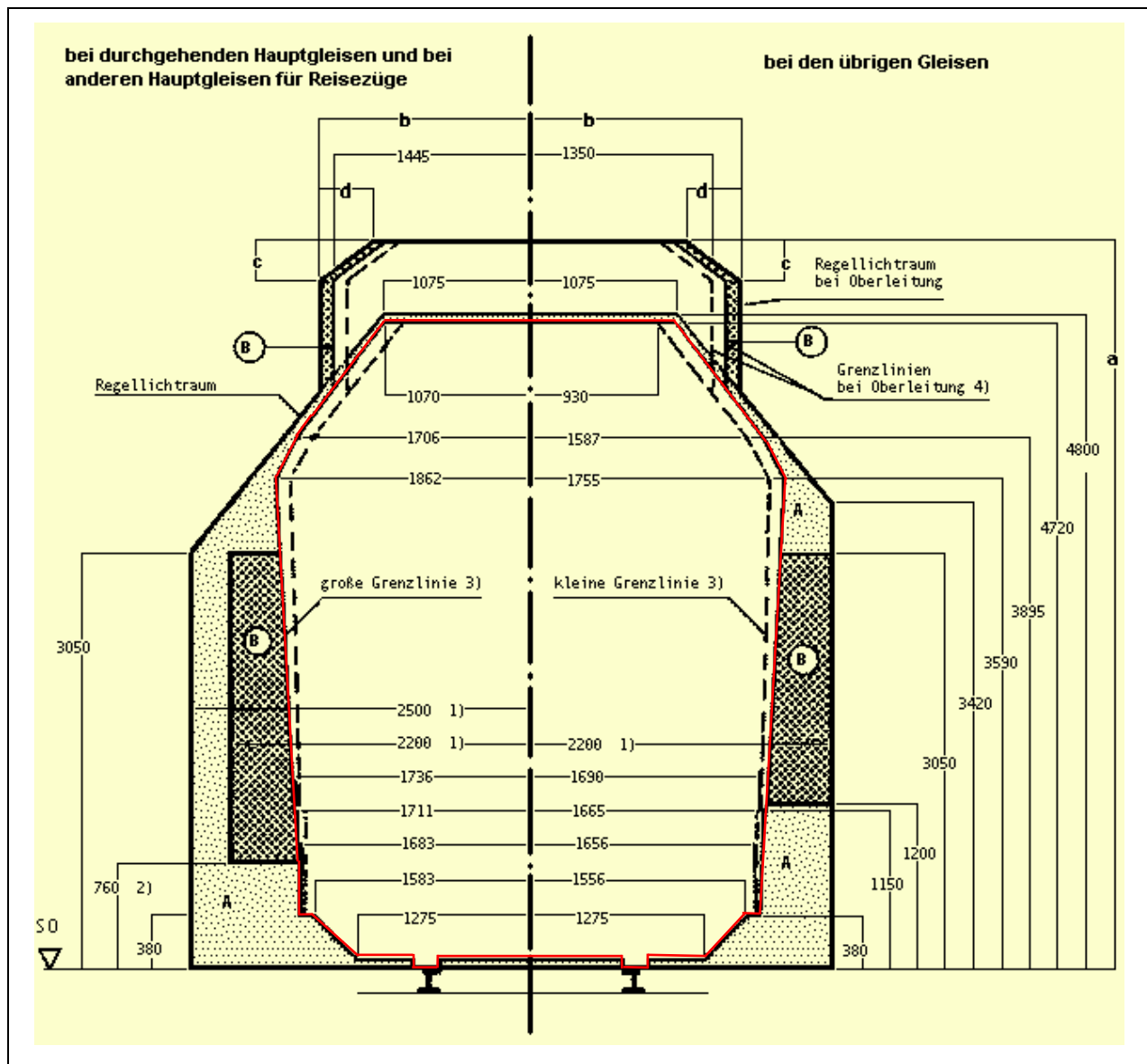


Abbildung 62: Regellichraum in der Geraden und im Bogen bei Radien von 250 m und mehr aus [EBOW 2012], Freihaltung des von der Grenzlinie umschlossenen Raumes gemäß [EBO 2012], § 9 Abs. 3 erforderlich, soweit es sich nicht um Einrichtungen zum Reinigen oder Instandsetzen von Fahrzeugen handelt und diese Gleise nicht nur dafür verwendet werden, Maße in [mm]

Das Regellichtraumprofil als ein Linienzug, der sich aus der Bezugslinie ableitet und festgelegte Sicherheitsabstände beinhaltet, kann als die absolute sicherheitsrelevante Schnittstelle zwischen Fahrzeugbetrieb und Infrastruktur angesehen werden.

Zur einfacheren Darstellung des Regellichtraumprofils wird im weiteren Verlauf dieses Anhangs die rot gekennzeichnete große Grenzlinie, wie in Abbildung 62 dargestellt, verwendet. Auf die Berücksichtigung konkreter Maße wird mangels Relevanz für diese Arbeit verzichtet.

1.2 Die Definition des sicherungstechnisch gesicherten Regellichtraums

In [EBO 2012], Anlage 1 werden für den Regellichraum Maße in der Ebene senkrecht zur Gleisachse für das rechtwinklige Profil zur Gleisachse festgelegt, welche sich räumlich betrachtet auf die Höhe und die Breite beschränken. Vorgaben zur dritten Achse, die zu jeder räumlichen Betrachtungsweise gehören, finden sich dagegen in [EBO 2012], § 9 nicht.

Mit dem Zulassen einer Zugfahrt müssen im gesicherten Fahrwegabschnitt innerhalb des Regellichtraums nicht nur die Beschränkungen für bauliche Anlagen eingehalten sein. *„Um den Fahrweg zu sichern, müssen vor dem Befahren die jeweilige Lage der beweglichen Fahrwegelemente sowie weitere sicherheitsrelevante Bedingungen gegeben sein. Ist ein Fahrweg derart gesichert, wird er Fahrstraße genannt [MASC 2012].“*

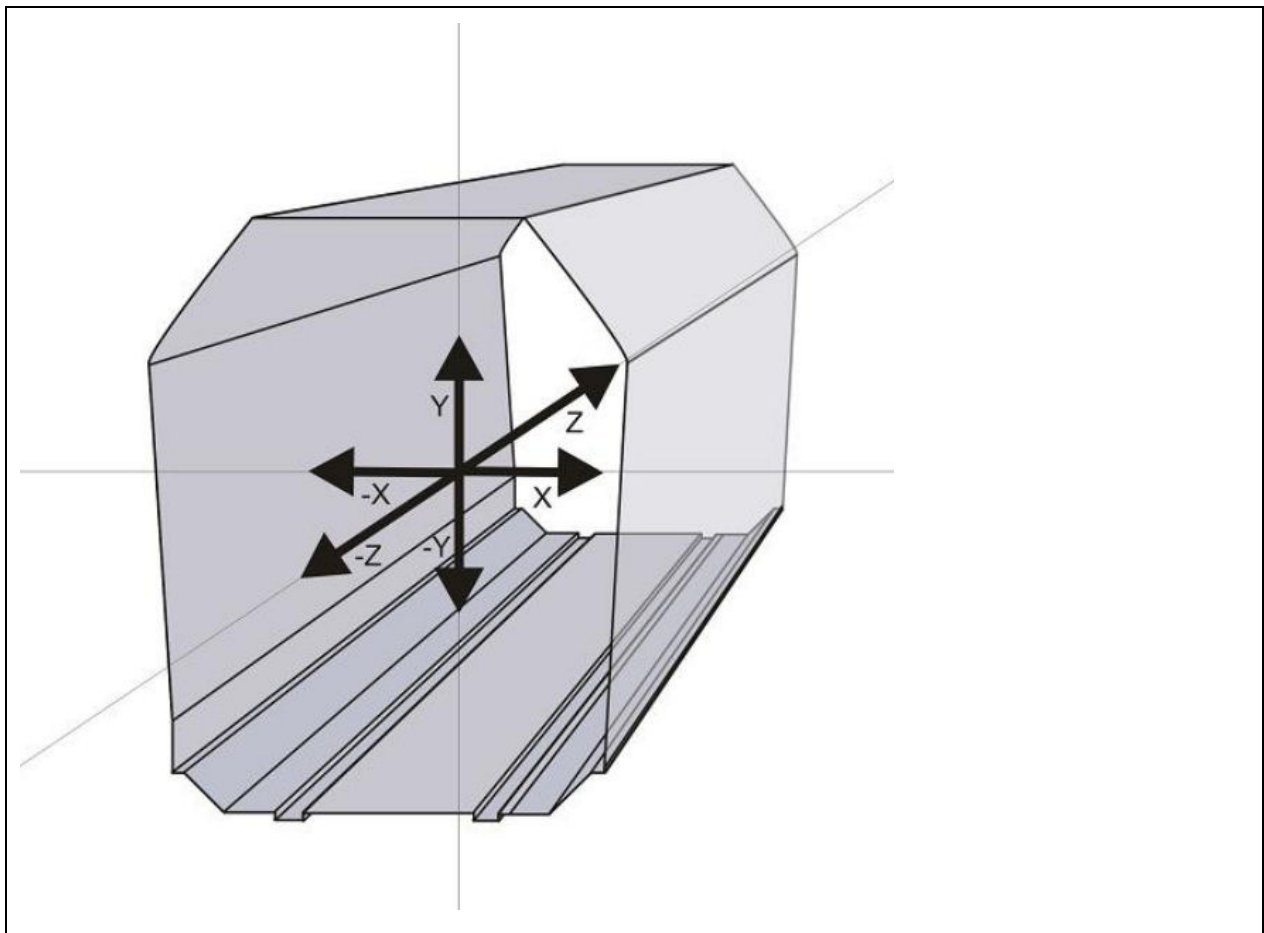


Abbildung 63: Dreidimensionale Darstellung des Regellichtraums mit Koordinatensystem

Der Fahrweg wird in [NAU 2002] definiert als *„Summe der befahrenen Weichen und Gleisabschnitte zwischen einem Startpunkt (z. B. Einfahrtsignal) und einem Zielpunkt (z. B. Ausfahrtsig-*

nal). Sind beim Benutzen eines F. (ergänze: Fahrweg) alle Gefährdungsmöglichkeiten ausgeschlossen, wird er als gesicherter F., anderenfalls als ungesicherter F. bezeichnet.“

Drei Koordinatenachsen in Abbildung 63 spannen den Regellichraum auf. Die zwei Achsen, welche rechtwinklig zur Gleisachse liegen und das Regellichraumprofil einschließen, werden mit x und y bezeichnet und die Achse längs der Gleisachse mit z. Das Vorliegen der Bedingungen für einen gesicherten Fahrweg in z-Richtung wird in wesentlichen Teilen von der Eisenbahnsicherungstechnik geprüft. Der Regellichraum wird nachfolgend für die Länge des gesicherten Fahrweges als „sicherungstechnisch gesicherter Regellichraum“ bezeichnet.

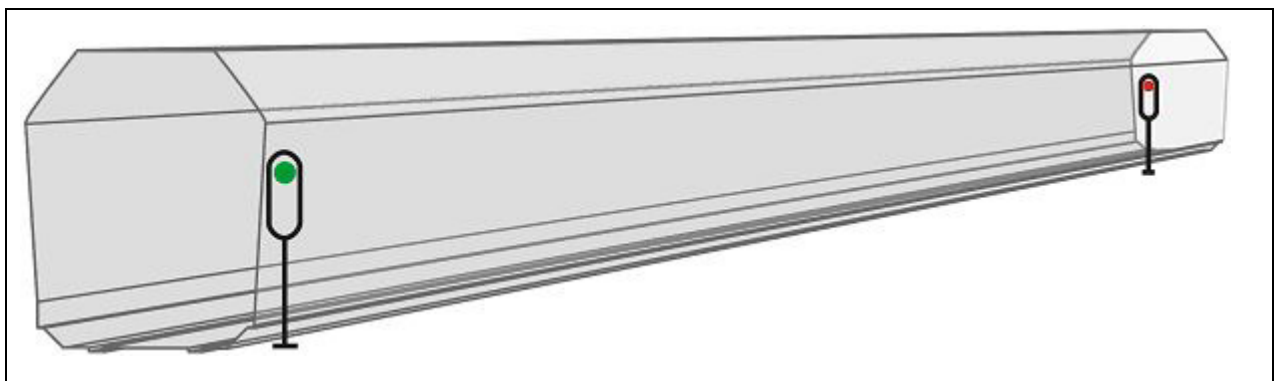


Abbildung 64: Dreidimensionale Darstellung des sicherungstechnisch gesicherten Regellichtraums, begrenzt in der z-Achse im Sinne der Abbildung 63 durch die Endlichkeit des gesicherten Fahrwegs

Der sicherungstechnisch gesicherte Regellichraum (Abbildung 64) kann als Hilfsmittel zur systematischen Erfassung der Systemdefinitionen, Gefährdungsidentifikationen, der Beurteilung und Bewertung von Gefährdungen und der abgeleiteten Maßnahmen zum Erreichen eines gewünschten Sicherheitsniveaus dienen und wird diesbezüglich nachfolgend verwendet. Die Festlegung eines Nullpunktes für das Koordinatensystem ist nicht erforderlich, da hieraus in dieser Arbeit keine quantitativen Betrachtungen durchgeführt werden.

In [MASC 2009] wird ausgeführt, dass aus dem Verlust der Spurführung unkontrollierte, gefährliche Bewegungen des Schienenfahrzeugs resultieren mit möglicherweise anschließenden Kollisionen.

Aus den in Kapitel 1 und Anhang 1 genannten Gefährdungen mit korrelierendem Entstehen rechtswidriger Zustände u. a. durch den Verstoß gegen gesetzliche Vorgaben in [EBO 2012] ist eine sicherheitliche Befassung mit der Thematik der HOA/FBOA notwendig.

Anhang 2

Es folgen wichtige Ausführungen zu HOA/FBOA aus [RIL 408.0553]:

Abschnitt „1 Feststellen, Melden

(1) Wenn Sie an Fahrzeugen oder Ladungen Unregelmäßigkeiten (z. B. Brandgeruch, Ölqualm, Flammenbildung, rotglühende Radsatzlager, Pfeiftöne, blockierter Radsatz, Funkensprühen am Radsatz, kreischendes Geräusch, rotglühende Bremsklötze oder Radreifen, brennende Bremsbeläge, unruhiger Lauf des Fahrzeugs, klapperndes klirrendes Geräusch, regelmäßiges starkes Klopfen oder Schlagen, lose Wagendecken, verschobene Ladung) feststellen oder wenn Ihnen solche Unregelmäßigkeiten gemeldet werden, müssen Sie, außer wenn eine Unregelmäßigkeit nach Absatz 2 angezeigt wird, Maßnahmen bei Gefahr treffen.“

„(2) a) Wird Ihnen als Fahrdienstleiter durch eine Heißläuferortungsanlage oder Festbremsortungsanlage ein Heißläufer oder ‚Feste Bremse – heiß‘ angezeigt, müssen Sie den Zug an dem in den Örtlichen Richtlinien genannten Hauptsignal anhalten. In den Örtlichen Richtlinien können abweichende Regeln zum Anhalten des Zuges gegeben sein.

b) Wird Ihnen als Fahrdienstleiter durch eine Heißläuferortungsanlage oder Festbremsortungsanlage ein Warmläufer oder ‚Feste Bremse – warm‘ angezeigt, müssen Sie den Zug in dem in den Örtlichen Richtlinien genannten Bahnhof anhalten.

c) Teilen Sie dem Triebfahrzeugführer vor dem Anhalten des Zuges die Art der Meldung, den betroffenen Radsatz und die betroffene Zugseite mit.“

Bezüglich der nachfolgenden Untersuchung des detektierten Zuges wird in [RIL 408.0553] ausgeführt:

Abschnitt „2 Untersuchen

(1) a) Nach dem Anhalten müssen Sie als Fahrdienstleiter dem Triebfahrzeugführer die Unregelmäßigkeit mitteilen, sofern ihm diese nicht schon nach Abschnitt 1 Absatz 2 mitgeteilt worden ist.

b) Als Triebfahrzeugführer müssen Sie - auch wenn Sie eine Unregelmäßigkeit selbst festgestellt haben -

1. den Zug nach der Unregelmäßigkeit absuchen,

2. bei Anzeige durch eine Ortungsanlage das geortete Fahrzeug untersuchen;

können Sie an diesem Fahrzeug keine Unregelmäßigkeit feststellen, müssen Sie das davor und dahinter laufende Fahrzeug nach Wärmequellen absuchen,

3. dem Fahrdienstleiter die zu treffenden Maßnahmen mitteilen.

(2) Haben Sie als Fahrdienstleiter einen Zug mit einem durch Heißläuferortungsanlage angezeigten Heißläufer an einem Einfahrsignal angehalten, dürfen Sie den Zug durch den Triebfahrzeugführer im Bahnhof untersuchen lassen, sofern dies in den Örtlichen Richtlinien für Mitarbeiter auf Betriebsstellen nicht verboten ist. Sie müssen den Zug in das durchgehende Hauptgleis einlassen. Während der Einfahrt des Zuges dürfen unmittelbar benachbarte Gleise nicht befahren werden. Als Triebfahrzeugführer dürfen Sie den Zug nur mit Schrittgeschwindigkeit in den Bahnhof fahren.“

Abschnitt 3 befasst sich mit dem Umgang mit festgestellten Schäden an Fahrzeugen:

„Als Triebfahrzeugführer müssen Sie, sofern ein Wagenmeister nicht zur Verfügung steht, Fahrzeuge mit Mängeln, die den Bahnbetrieb gefährden können, aus dem Zug aussetzen.“

Im Abschnitt 4 wird festgelegt:

„Als Fahrdienstleiter müssen Sie Unregelmäßigkeiten und Maßnahmen nachweisen.“

Anhang 3

Auszug der Regelung zu HOA in [TSI SRT]:

„4.2.4.1 Heißläuferortungsanlagen

In Netzen mit Tunneln müssen streckenseitige Heißläuferortungsanlagen oder andere Geräte zur Früherkennung an strategischen Punkten angebracht werden, damit Heißläufer mit hoher Wahrscheinlichkeit erkannt werden, bevor der Zug in einen Tunnel einfährt, so dass ein defekter Zug bereits vor der Einfahrt in einen Tunnel angehalten werden kann.

Der Infrastrukturbetreiber muss im Infrastrukturregister die streckenseitigen Heißläuferortungsanlagen und deren Standort angeben. Das Eisenbahnunternehmen muss entsprechende Informationen in das Streckenbuch aufnehmen.“

„4.4.1.2.2. Ereignisse durch Heißläufer

Wenn Heißläufer festgestellt werden:

- muss der betroffene Zug baldmöglichst an einer geeigneten Stelle vor einem Tunnel angehalten werden;*
- ist der Infrastrukturbetreiber unverzüglich über den Standort zu informieren, an dem der Zug angehalten wird;*
- sind die betroffenen Teile vom Zugpersonal zu prüfen;*
- muss das Eisenbahnunternehmen Regeln für die Fortsetzung des sicheren Betriebs unter den gegebenen Störungsbedingungen vorsehen.“*

„6.2.7.7. Heißläuferortungsanlagen

Die benannte Stelle hat zu bestätigen, dass Heißläuferortungsanlagen oder Vorrichtungen zur Früherkennung gemäß den Anforderungen in Abschnitt 4.2.4.1 verfügbar sind und dass der Infrastrukturbetreiber Verfahren für Maßnahmen im Alarmfall festgelegt hat, die verhindern, dass fehlerverdächtige Fahrzeuge in einen Tunnel einfahren oder in einem Tunnel anhalten.“